

OPTIMIZACIÓN DE LA COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA SEDE RECREACIONAL CAMPOALEGRE – CAJASAN

MARÍA FERNANDA DOMÍNGUEZ AMOROCHO

**UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2010

OPTIMIZACIÓN DE LA COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA SEDE RECREACIONAL CAMPOALEGRE – CAJASAN

MARÍA FERNANDA DOMÍNGUEZ AMOROCHO

Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniera Ambiental

Director:

Ing. M.Sc. ALVARO ANDRÉS CAJIGAS CERÓN

**UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2010

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVOS.....	11
OBJETIVO GENERAL.....	11
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	11
ANTECEDENTES.....	12
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	14
1.1 COAGULACIÓN.....	14
1.1.1 Factores que influyen en la Coagulación.....	14
1.1.2 Mecanismos de Coagulación.....	17
1.1.3 Coagulante utilizado.....	19
1.1.4 Mezcla Rápida.....	20
1.1.5 Potencial zeta.....	21
1.2 FLOCULACIÓN.....	22
1.2.1 Tipos de Floculación.....	22
1.2.2 Factores que influyen en la Floculación.....	23
1.3 DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN.....	25
2. METODOLOGÍA.....	26
2.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE SEDE RECREATIVA CAJASAN CAMPOALEGRE, PTAP Cajasan.....	26
2.2 SELECCIÓN DE MUESTRAS.....	27
2.3 IDENTIFICACIÓN DE GRADIENTES.....	28
2.4 COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA EN DOS PERIODOS DE LLUVIA.....	28
2.5 CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE TURBIEDAD.....	30
2.6 DETERMINACIÓN DE LOS GRADIENTES Y TIEMPOS ÓPTIMOS DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN.....	31
3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	33
3.1 COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA EN DOS PERIODOS DE LLUVIA.....	33
3.2 CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN PARA	

LA REMOCIÓN DE TURBIEDAD.....	38
3.2.1 Periodo de transición.....	39
3.2.2 Periodo lluvioso.....	41
3.3 DETERMINACIÓN DE LOS GRADIENTES Y TIEMPOS ÓPTIMOS DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN.....	43
3.3.1 Identificación de gradientes y tiempos de Mezcla Rápida.....	43
3.3.2 Identificación de gradientes y tiempos de Mezcla Lenta.....	47
3.3.3 Ecuación de Letterman.....	49
4. CONCLUSIONES.....	52
5. RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Criterios de selección de las muestras.....	27
Tabla 2. Equipos utilizados.....	28
Tabla 3. Relación de grupos.....	29
Tabla 4. Comparación grupos 1 y 2.....	33
Tabla 5. Comparación grupos 3 y 4.....	33
Tabla 6. Comparación grupos 1 y 3.....	35
Tabla 7. Comparación grupos 2 y 4.....	35

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de Coagulación.....	25
Figura 2. Vista general de la PTAP Cajasan.....	26
Figura 3. Reconocimiento partes de la PTAP Cajasan.....	27
Figura 4. Dispersión datos Grupo3-Grupo 4 Turbiedad.....	36
Figura 5. Dispersión datos Grupo 1-Grupo 3 Alcalinidad.....	37
Figura 6. Dispersión datos Grupo 2-Grupo 4 Alcalinidad.....	37
Figura 7. Dispersión datos Grupo 1-Grupo 3 Color.....	37
Figura 8. Dispersión datos Grupo 2-Grupo 4 Color.....	37
Figura 9. Diagrama de Coagulación Periodo de Transición.....	39
Figura 10. Diagrama de Coagulación Periodo Lluvioso (1).....	41
Figura 11. Diagrama de Coagulación Periodo Lluvioso (2).....	41
Figura 12. Gradiente mezcla rápida en Periodo de Transición.....	43
Figura 13. Gradiente mezcla rápida en Periodo Lluvioso.....	44
Figura 14. Tiempo óptimo de mezcla rápida Periodo de Transición.....	45
Figura 15. Tiempo óptimo de mezcla rápida Periodo Lluvioso.....	46
Figura 16. Turbiedad final Periodo de Transición.....	48
Figura 17. Turbiedad final Periodo Lluvioso.....	48

ANEXOS

Pág.

1. Cálculo de gradiente de velocidad para Coagulación y Floculación.....	59
2. Porcentaje de ocurrencia de variables medidas.....	61
3. Frecuencia de ocurrencia de la Turbiedad, pH, porcentaje de Remoción para la construcción de Diagramas de Coagulación.....	65
4. Turbiedad Final para pruebas de Mezcla Rápida.....	67
5. Turbiedad final para pruebas de Mezcla Lenta.....	68

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: OPTIMIZACIÓN DE LA COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA SEDE RECREACIONAL CAMPOALEGRE – CAJASAN

AUTOR: María Fernanda Domínguez Amorocho

FACULTAD: Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Álvaro Andrés Cajigas Cerón

RESUMEN

La optimización de la coagulación floculación de la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre – Cajasan, tiene como fases de estudio, la determinación del comportamiento de parámetros como la Turbiedad, el color, el pH y la alcalinidad en relación a los eventos de lluvia y a dos fuentes de abastecimiento de la planta, por otra parte, la construcción de diagramas de Coagulación para la remoción de Turbiedad, para la identificación de la zona óptima de remoción del agua predominante en la planta, y finalmente, la determinación de gradientes de velocidad y tiempos de mezcla más favorables para la coagulación-floculación. En el desarrollo del estudio se identificaron las diferencias significativas en la Turbiedad en el periodo lluvioso, así como en la Alcalinidad y el Color en las fuentes. También, la zona óptima de Coagulación se ubicó en un rango pH de 5,5 a 7,5 unidades y a dosis de coagulante de 20 a 40 mg/l, además, el gradiente y tiempo de mezcla rápida fueron de 250RPM ($248s^{-1}$) y 1 minuto respectivamente, y para mezcla lenta se desarrolló el modelo de la ecuación de Letterman que permitió obtener los gradientes de $2,88s^{-1}$ y $3,66s^{-1}$ en tiempos de 54 y 35 minutos como óptimos en los periodos de lluvia para la floculación.

PALABRAS CLAVES: Coagulación, floculación, coloides, turbiedad, pH, alcalinidad.

GENERAL ABSTRACT

TITLE: OPTIMIZATION OF COAGULATION – FLOCCULATION PROCESSES FROM THE WATER SUPPLY TREATMENT PLANT OF CAMPOALEGRE – CAJASAN RECREATIONAL CAMP

AUTHOR: María Fernanda Domínguez Amorocho

FACULTY: Environmental Engineering

DIRECTOR: Álvaro Andrés Cajigas Cerón

ABSTRACT

Optimization of coagulation-flocculation processes from the water supply treatment plant of Campoalegre – Cajasan recreational camp, has as study phases, determining the behavior of parameters such as turbidity, color, pH and alkalinity with relation to rainfall events and two sources of plant supply. On the other hand, it has been considerate the design of Coagulation's Diagrams for turbidity removal, identification of the optimal water removal predominant in the plant and finally, the determination of velocity gradients and mixing times more favorable to coagulation-flocculation processes. As results of the study significant differences in the parameters of turbidity in the rainy season and alkalinity and Color in the sources were identified. Additionally, the optimal coagulation point was set in a pH range from 5.5 to 7.5 units and coagulant dose of 20 to 40 mg / L. The gradient and fast mixing time were 250RPM ($248s^{-1}$) and 1 minute respectively, while for slow mixing the model from Letterman equation that allowed obtaining the gradients of $2,88s^{-1}$ y $3,66s^{-1}$ in times of 54 and 35 minutes as optimum in the rainy periods to the flocculation was developed.

KEYWORDS: Coagulation, flocculation, colloids, turbidity, pH, alkalinity.

INTRODUCCIÓN

El centro vacacional y recreativo Campoalegre se encuentra situado a 15 minutos de Bucaramanga en el kilómetro 13 vía a Piedecuesta, el cual posee una extensión de 17 hectáreas, donde se ofrecen servicio de Camping y Hospedaje con una capacidad aproximada de 100 personas, servicios de salones y auditorios para encuentros sociales con una capacidad instalada aproximada de 500 personas, además de una amplia zona deportiva y zonas de descanso.

La planta de tratamiento de agua construida en el centro recreacional sule las necesidades básicas de todo el centro recreacional, con una calidad de agua aceptable que permiten su consumo de de una manera segura; sin embargo, no se tiene control de la dosificación de químicos y parámetros de funcionamiento.

La literatura reporta que los inconvenientes generados en el óptimo funcionamiento de sistemas de agua, se generan principalmente por los cambios de la calidad del agua cruda, que genera una inconstante calidad de agua tratada, donde la causa principal es la baja eficiencia en los procedimientos de tratamiento implementados y la capacitación del personal involucrado, repercutiendo en probables daños a la salud.

Este trabajo contempla la caracterización del agua observando el comportamiento de la Turbiedad, y el Color en dos eventos de lluvia, además de procedimientos viables que conlleven a la identificación de parámetros óptimos de operación de la planta, como gradientes y tiempos óptimos de coagulación y floculación, además de la construcción de diagramas de coagulación para la adecuada dosificación de coagulantes para una condición representativa en la captación.

OBJETIVOS

General

Optimizar los parámetros de operación en el proceso de coagulación – floculación de la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre – Cajasan.

Específicos

- Identificar el comportamiento de la Turbiedad, color, pH y alcalinidad del agua cruda en dos periodos de lluvia.
- Evaluar la zona óptima de coagulación de la PTAP – Cajasan en la calidad de agua predominante mediante la construcción de diagramas de coagulación.
- Determinar para la mezcla rápida y la mezcla lenta, el gradiente, el tiempo y la dosis optima para la operación de la PTAP – Cajasan, en la calidad de agua predominante.

ANTECEDENTES

Investigaciones logradas en el Tratamiento de agua Potable y la implementación de metodologías apropiadas para tal fin son dadas mediante la identificación de procesos que den mejoramiento a la calidad del agua para un posterior consumo humano, además de la identificación de parámetros de gran trascendencia en el proceso y de los cuales la calidad final del agua es dependiente.

En el país los proyectos realizados en base a la optimización de los procesos son reducidos puesto que el mejoramiento más a fondo en las condiciones de operación de plantas de tratamiento de Agua Potable requieren de extensa experimentación para la consecución de parámetros óptimos de operación para la identificación de las características que más influyen en la calidad del agua final.

En primer lugar, en la zona que abastece de agua potable a comunidades habitantes del sector de las laderas de la zona occidental de la ciudad de Santiago de Cali, específicamente en los barrios Vistahermosa y Patio Bonito, se realizó un proyecto en el año 2006, encaminado a optimizar la calidad de agua del acueducto La Elvira, del que son abastecidos, mejorando la reducción de aspectos como turbiedad, para la corrección de problemas que afectan a la población consumidora; los problemas más comunes que la comunidad presentaba al consumir esta agua eran, problemas gastrointestinales e infecciones en la piel de la población. Este proyecto fue realizado por el Departamento de Producción de Agua Potable de EMCALI EICE ESP, con la colaboración de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del ambiente (EIDENAR) de la Universidad del Valle [1].

De una manera semejante, se realizó en la ciudad de Santiago de Cali, un estudio de tratabilidad comparativo entre la Planta de agua potable del Río Cauca y la planta de Puerto Mallarino; en este proyecto, se perpetraron técnicas de floculación-coagulación, para el manejo del aumento en la turbiedad de la planta y color, implementándose diagramas con énfasis en las zonas óptimas de barrido en el proceso, el cuál es el proceso más óptimo [2].

Otro estudio realizado en Colombia, con respecto a la identificación de metodologías de optimización de plantas de agua potable, donde se encuentra la prueba de coagulación, es la Optimización del proceso de coagulación mediante la

construcción de diagramas de coagulación, caso Planta Río Cali. Este estudio fue realizado en el año 2007, en la ciudad de Santiago de Cali, donde se midieron aspectos como la turbiedad y el color, obteniéndose en este caso, mayor variación y remoción efectiva de la turbiedad respecto del color. Además, se encontraron parámetros óptimos de funcionamiento respecto del pH, y la identificación de zonas de coagulación [3].

También Franceschi et al., [4] realizó la Optimización del proceso de Coagulación-Floculación de agua cruda por un método de diseño óptimo, donde buscaron la minimización de la turbiedad residual en la consecución de la dosis óptima de Sulfato de Aluminio a la vez que se reducían los costos de operación en la reducción del parámetro más crítico en el proceso, y también mantenían el control en las partículas de arcillas material más común en la turbiedad de este tipo de agua además de los ácido húmicos y el pH, parámetro importante en la eficiencia del proceso.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 COAGULACIÓN

Es el proceso donde se desestabilizan las partículas coloidales, por medio de la ayuda de un coagulante (agente químico). [5]

La coagulación está influenciada por las cargas de las partículas coloidales. Las partículas de tamaño pequeño tienden a estar cargadas negativamente, por lo tanto las cargas iguales se repelen. Por tal motivo, esta repulsión evita la agregación en partículas de mayor tamaño para su posterior sedimentación [6].

1.1.1 Factores que influyen en la coagulación

Características físicas:

- Color

Para lograr una óptima remoción de color en el agua, el valor de pH debe estar entre 4 y 12 unidades en procesos de coagulación y floculación. [7]

Según algunos autores, a medida que el pH disminuye, el color también disminuye su intensidad, igualmente se encuentra la relación directa en la remoción del color con la dosis de coagulante aplicada, encontrándose de esta manera, bajos niveles de color a pH y dosis bajas. [3]

- Turbiedad

La turbiedad en fuentes naturales de agua es debida en parte al contenido de partículas de arcilla y otros minerales, entonces la influencia de la turbiedad puede ser notada con respecto a la dosis de coagulante a suministrar. A medida que la turbiedad aumenta es necesario aumentar la dosis del coagulante, pero en una menor cantidad al aumento en el parámetro. En aguas donde la turbiedad es muy

alta, resulta paradójico el uso de dosis de coagulante pequeñas, debido a que existe una mayor probabilidad en el choque de las partículas coloidales. [8]

En este caso incluyen tamaño y concentración coloidal, donde es necesaria la adición de coagulante relacionada con el tamaño de partícula. Cuando la turbiedad en el agua es mínima, es necesaria una gran cantidad de coagulante para la formación de flóculos de barrido y así estos puedan arrastrar las partículas. [9]

La interacción de partículas coloidales y de ácidos húmicos al disolverse con el aluminio, reduce de manera significativa el efecto del coagulante, limitando la polimerización del aluminio. Por tal motivo aumenta la turbiedad residual respecto de la inicial en la muestra. [4]

Incluso la turbiedad se puede relacionar con el color. Al generarse grandes cantidades de color en el agua por lo sólidos en suspensión se logran complicaciones en los procesos de coagulación-floculación [10], por otro lado, es posible la reducción de niveles de turbiedad al aplicarse la dosis óptima de coagulante [11].

Características químicas

- Alcalinidad

Donde los iones H^+ reaccionan con la alcalinidad, para favorecer la reacción de desestabilización, de esta manera influye en la velocidad de reacción del coagulante en el agua, ya que a alcalinidad baja la velocidad es lenta, por el contrario con alcalinidad alta la reacción se da de manera instantánea. [9]

Las aguas con alcalinidad alta, pueden necesitar mayores niveles de coagulantes para lograr de esta manera el descenso del pH a los valores favorables para la coagulación. [12]

Cuando la alcalinidad es baja, la hidrólisis del aluminio en solución y con la ventaja de formación de $Al(OH)_3$, puede reducir el pH.

De igual manera, la interacción de los productos generados con los coloides cargados generalmente de manera negativa en aguas naturales, y en pH bajo, los mecanismos de acción del Sulfato de Aluminio dependen de la absorción de estas formas hidrolizadas con la neutralización de las cargas de los coloides. [4]

○ pH

Es el parámetro en el que especialmente se destaca, puesto que se tiene que controlar en el proceso, puesto que afecta la solubilidad de los precipitados que son formados por el aluminio, además del tiempo requerido para la formación del flóculo y la carga sobre las partículas de coloides [12].

El pH también tiene relevancia en la solubilidad del coagulante en la mezcla, porque la óptima coagulación ocurre cuando los valores de pH son mínimos ayudando a la máxima presencia de flóculos que reducen la turbiedad [13].

Además, si el pH no se encuentra en un rango adecuado para la coagulación y floculación, la clarificación es mínima a la vez que se solubiliza el aluminio. Cuando la dosis de coagulante es menor, la sensibilidad que tiene el flóculo a cambios en el pH es mayor. [14]

Por otra parte, el pH óptimo está relacionado con la carga, si el pH es neutro la carga es neutra, así se maneja un punto isoeléctrico, donde el potencial zeta es el mínimo, además, en este mismo punto la cantidad de coagulante necesaria es también mínima [14], y se encuentra un rango de pH óptimo para el proceso de coagulación floculación, en un tiempo más reducido. Este rango, se ve afectado por el tipo de coagulante empleado, la composición química del agua y la dosis de coagulante.

Con respecto al coagulante, la zona óptima de pH se encuentra en los valores que logran la mínima solubilidad de los productos de hidrólisis. Por tal motivo, la coagulación debe llevarse a cabo en la zona óptima de pH, entonces en el caso contrario se gastará mayor cantidad de productos químicos y el resultado del agua tratada será de baja calidad.

En lo que tiene que ver con el ajuste en el pH con algún producto químico, una manera fácil de lograr un descenso en el pH, sin la utilización de algún producto químico, es agregando coagulante en exceso.

Esto está dado por la influencia de las sales disueltas en la coagulación, puesto que el ión que reacciona con el agua en el proceso modifica factores como la zona de pH óptima, dosis óptima de coagulante, además del tiempo de mezcla lenta.

Lo anterior puede ser explicado con la existencia del ión $\text{SO}_4^{4=}$, que permite que se aumente la zona óptima del pH en sentido ácido, en este caso para el sulfato de Aluminio logrando además la reducción del tiempo de mezcla lenta en el rango de pH de 4,8 a 6,8.

De la misma forma, los fosfatos logran el desplazamiento de la zona óptima del pH al lado ácido, pero no se aprecia ampliación en el rango de pH, esto hace también, que sea necesario el aumento de forma reducida en la dosis de coagulante requerida para la coagulación. [8]

1.1.2 Mecanismos de coagulación

- Compresión de doble capa

Es lograda por la atracción de los iones con la carga superficial de los coloides que es negativa, los cuales atraen a su vez iones de carga contraria formando una capa densa cercana la cual se denomina Capa de Stern.

En el siguiente plano, una segunda capa denominada difusa, comprende iones de ambas cargas eléctricas prevaleciendo los de carga contraria. La unión de las dos capas es lo que se conoce como doble capa.

Para conseguir la compresión de la doble capa, simplemente se logra añadiendo a la capa difusa hasta comprimirla, suficientes iones cargados contrariamente, lo que genera la reducción de la energía que demanda para el movimiento de partículas de carga similar. Este mecanismo no es útil en el tratamiento de agua puesto que son necesarias altas concentraciones de sal. [15]

La identificación de este mecanismo con el uso del Sulfato de Aluminio, no es adecuado, puesto que en el proceso el Aluminio no es un electrolito indiferente, esto quiere decir, que este reacciona con el agua y con la alcalinidad en la muestra. [16]

- Barrido

Comprende el arrastre de partículas en los precipitados de aluminio, donde los flóculos generados logran velocidades de sedimentación altas, además son de

gran tamaño, en contraste a los resultados que se pueden conseguir en la coagulación por adsorción-neutralización. El incremento de la velocidad de precipitación de las partículas coloidales es debido a la presencia de los aniones del sulfato, es por esto que las partículas sirven de base para la formación de precipitados, en el que se favorece la precipitación con el aumento en la concentración de partículas. [17]

Para que se logre la desestabilización de las cargas de las partículas, es indispensable la reducción del potencial zeta, donde la dosis de coagulante utilizada para la desestabilización es mayor que la necesaria. Este exceso de sales forma hidróxidos insolubles que se precipitan en pequeñas partículas coloidales, logrando así la coagulación de barrido.

- Adsorción y Neutralización de carga

Cuando es utilizado el Sulfato de aluminio como coagulante y la neutralización de carga es el primer mecanismo de coagulación, una efectiva mezcla rápida es crítica en el éxito del proceso. Cuando el primer mecanismo es atrapado, la efectividad en la mezcla rápida es menos crítica, y la floculación es el proceso más importante. [18]

Cuando predomina este mecanismo, el coagulante debe ser dispersado de manera inmediata en el agua, cuando se utilizan sales de Aluminio o Hierro como coagulante, puesto que no se logrará la desestabilización completa porque no se cumple la hidrólisis del coagulante. [17]

Además utilizando sulfato de aluminio, se forman complejos hidroxilados a dosis bajas de Aluminio, que son adsorbidos por los coloides para realizar la desestabilización, si por el contrario, la dosis aumenta, los coloides pueden llegar a reestabilizarse logrando de esta manera cargas positivas. [16]

Este mecanismo se ubica en un dominio de pHs ácidos y dosis bajas de coagulante, donde las especies monoméricas y poliméricas del Al(III) resultan encargados de la coagulación. Puede lograrse reestabilización coloidal en este mecanismo si la dosis de coagulante es aumentada hasta conseguir valores de pH más altos de 5.5 unidades aproximadamente, dando como resultado además de la reestabilización la disminución en el porcentaje de remoción.

La adsorción – neutralización ocurre cuando los iones cargados de manera contraria provenientes del coagulante, son adsorbidos en la superficie de la partícula, y de esta manera neutralizando las cargas repulsivas. El agregar de manera excesiva iones de carga contraria, puede contribuir a que se logra una reestabilización de las cargas en las partículas.

Las partículas coloidales pueden inducirse a la precipitación al agregarse el compuesto químico que ayude a la neutralización de cargas eléctricas de la partícula suspendida, prescindiendo de las fuerzas de repulsión.

- Adsorción y formación de puentes interparticulares

Este mecanismo de coagulación, se da cuando el polímero agregado reacciona en una parte con la zona superficial de las partículas coloidales, y la parte restante se dilata hacia la solución.

La parte dilatada, puede entrar en contacto con algunos segmentos de adsorción disponibles en una segunda partícula coloidal, y así formar uniones (partícula-polímero-partícula). Si la segunda partícula coloidal no está disponible, las partes dilatadas del polímero pueden ser adsorbidas en la misma partícula, de lo cual se deriva que el polímero no sirva de puente, por lo tanto las partículas se reestabilizarán. [17]

1.1.3 Coagulante utilizado

El coagulante utilizado es el Sulfato de Aluminio con fórmula química $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, comúnmente conocido como Alumbre, en su forma granulada. La función del coagulante es atrapar los coloides logrando una coagulación de barrido en la mayoría de los casos cuando la concentración coloidal es baja. Además debe señalarse, que si hay una sobredosificación de coagulante, el fenómeno puede revertirse y restituirse el coloide negativo, causando de nuevo problemas de turbiedad o color [12].

La dosis de coagulante está estrechamente relacionada con el rango de pH en el que se mueve esta dosis. Está relación es definida así: la dosis es directamente proporcional al rango de pH, esto donde el coagulante es efectivo. [14]

Asimismo, si la cantidad de coagulante agregada es mínima, y si por el contrario la cantidad de coagulante es demasiada, puede provocar un exceso de productos químicos en el agua final. [6]

La turbiedad residual se ve afectada dependiendo de la cantidad de coagulante suministrado. Si se agrega poca cantidad de coagulante, la coagulación no es efectiva y no se neutraliza la carga totalmente, por tanto la formación de flóculos es insuficiente, aumentando la turbiedad residual; si la cantidad de coagulante es mayor a la óptima, la superficie del flóculo se carga de manera positiva, resultando un potencial zeta positivo, a la vez que la partícula se dispersa nuevamente, además es probable que se produzca la inversión de la carga y así la formación de una elevada cantidad de flóculos de pequeños tamaños y bajas velocidades de sedimentación aumentando de la misma manera la turbiedad residual. [19].

1.1.4 Mezcla rápida

Si las reacciones físico químicas se completan antes de que puedan ser adsorbidos por las partículas coloidales, entre el agua y el coagulante, se reduce la eficiencia en el proceso, lo que indica que hay que dosificar nuevamente para lograr resultados exitosos, si al comienzo la mezcla hubiera sido eficaz. [9]

Cuando se utiliza Sulfato de Aluminio para el proceso de desestabilización de las partículas, es importante que el coagulante sea distribuido rápida y eficientemente, porque los productos intermedios en la reacción de la coagulación son los encargados que el proceso se realice de la mejor manera.

En algunos casos, una mezcla excesiva puede causar el rompimiento de las partículas de flóculos formados, por lo tanto reduciendo la efectividad en la remoción de sólidos en el proceso. [18]

La mezcla del coagulante en el agua debe hacerse de manera homogénea, así es necesario realizar la mezcla en el menor tiempo posible puesto que las reacciones se logran en menos de ocho segundos por precipitación de hidróxidos y en menos de un segundo cuando la coagulación es realizada por adsorción. [20]

Es indispensable conocer si la coagulación se da completamente, la identificación de turbulencias desiguales permiten conocer que en toda la masa de agua el coagulante no se está dispersando equitativamente, sino que algunas zonas

tendrán mayor o menor cantidad de coagulante, además una inadecuada mezcla rápida logra un aumento de productos químicos en el tratamiento.

En cuanto a la agitación debe hacerse uniforme e intensa en toda la muestra de agua para tener plena confianza de que la mezcla del coagulante en el agua se ha realizado eficientemente y se dé la reacción química de desestabilización de cargas eléctricas.

En la coagulación, influyen factores como el tiempo de mezcla y el gradiente de velocidad óptimo para la formación de flóculos aptos para la sedimentación. El tiempo de mezcla interviene en la vida de los productos intermedios que son producidos en la reacción del coagulante con el agua en la coagulación, el cual es corto, entonces los productos pueden estar en contacto con las partículas si la desestabilización ha sido realizada [18]

Cuando son utilizadas las sales de Aluminio, el tiempo de mezcla debe ser mínimo, puesto que las reacciones de polimerización del coagulante ocurren con rapidez, lo mismo que la velocidad de adsorción del mismo por parte de las partículas [21].

En el instante en que se adiciona el coagulante se busca que este sea dispersado de manera uniforme y en el menor tiempo posible, si lo anterior no ocurre, no ocurrirá de manera satisfactoria la neutralización de los coloides y por tanto una parte del coagulante empezará a precipitar a manera de hidróxido metálico. [8]

Al variarse el gradiente de velocidad a un tiempo constante de mezcla rápida, ocurre un gradiente máximo, y del cual a continuación de este la formación del flóculo se hace más lenta [21]; cuando el gradiente que se utiliza es alto, e tiempo en que tardan los flóculos en formarse es lento [9]

1.1.5 Potencial zeta

Mide la magnitud y fuerza de la carga de cada partícula del coloide. Si el potencial zeta disminuye, se aumenta la posibilidad de una colisión.

Asimismo, las partículas coloidales resisten además el empuje gravitacional puesto que las cargas eléctricas sobre las partículas de coloides son del mismo signo, positivo o negativo, por lo tanto la recíproca repulsión evita el efecto de sedimentación por gravedad.

La utilización de un polímero catiónico, logra la reducción del potencial zeta, ayudando en la aglomeración de las partículas coloidales, disminuyendo de esta manera el volumen de lodo que se genera y la dosis de coagulante necesaria. [22]

En teoría, el potencial zeta debe proporcionar características óptimas para que la coagulación se logre de la mejor manera. [23]. Para que esto ocurra, deben considerarse las cargas eléctricas de los coloides, donde estas cargas producen fuerzas de repulsión entre los coloides, por lo tanto, si la carga que se genera es muy alta las partículas coloidales se quedan dispersas y en suspensión, y por el contrario, si se reducen las cargas entre las partículas, los coloides se aglomeran y sedimentan. Para conseguir que la reducción se realice, es posible la utilización o cambios en la atmósfera iónica, el pH o por la adición de compuestos que afecten de manera directa la carga del coloide como son los coagulantes. [24] Debe lograrse la reducción entre las partículas coloidales de las fuerzas de repulsión, para lograr la formación de aglomerados pesados y de mayor tamaño para que posteriormente sean sedimentados o filtrados con facilidad. [22]

1.2 FLOCULACIÓN

Es el proceso donde las partículas que se desestabilizaron en la coagulación chocan unas con otras para formar partículas de tamaño mayor. [25]

En el instante en que se realiza esta mezcla lenta, los flóculos formados de tamaño mayor son eliminados posteriormente en la sedimentación. [6]

1.2.1 Tipos de floculación

- Floculación Pericinéctica.

Es debida a fuente de agitación interna donde es caracterizado por el movimiento browniano de las partículas del agua, la cual se da de manera muy lenta, donde este tipo de movimiento se da por el movimiento rápido y desordenado de las partículas coloidales, donde estas partículas obtienen la energía de los choques entre estas con las moléculas de agua, para que el movimiento se logre.

El movimiento browniano entre las partículas contribuye en la formación de aglomeraciones esto dependerá de la desestabilización electrostática. [8]

El utilizar sistemas de agitación mecánica, logra el aumento en las colisiones de las partículas floculentas, por tal motivo, el proceso de floculación abarca gran tiempo de mezcla, y es necesaria la utilización de dispositivos de mezcla aptos, para que de manera natural ocurra el movimiento browniano entre las partículas de floculos formadas en el agua. [6]

Del mismo modo, este tipo de floculación se produce por la energía que generan las paletas del dispositivo mecánico en la agitación del agua. [25]

- Floculación Ortocinética.

Donde el movimiento es inducido al agua por medio de un medio externo de suministro de energía, donde es originado por un remolino o fuerza centrífuga, además es logrado por gradientes de velocidad originados por la disipación de energía hidráulica o mecánica, lo que se consigue el movimiento de las partículas coloidales a diferentes velocidades, lo que aumenta la probabilidad de choque.

Ocurre en un tiempo mínimo, poco tiempo después de la desestabilización, donde se agitan las partículas contenidas en la solución coagulada, hasta que las partículas tengan un tamaño adecuado para agregarse unas con otras. [25]

1.2.2 Factores que influyen en la floculación

- Naturaleza del agua

Entre las que se encuentran las características fisicoquímicas relevantes en el proceso de tratamiento, como el pH, alcalinidad y turbiedad. Esto puede influir en el cambio en el tiempo de floculación óptimo, donde son generados algunas cadenas poliméricas de hidróxidos que son formadas o que interactúan con las partículas coloidales y además algunos iones que están presentes en el agua afectan el equilibrio físico químico del proceso.

Por otro lado, el gradiente de velocidad también se ve afectado por el tamaño, la concentración y la naturaleza de las partículas generadoras de turbiedad.

- Tiempo de mezcla lenta

La velocidad de aglomeración de las partículas coloidales es proporcional al tiempo de mezcla.

No se logran resultados exitosos si el tiempo de permanencia del agua en el floculador está por encima o por debajo del óptimo, puesto que la velocidad de aglomeración de los flóculos es proporcional al tiempo de mezcla. [21]

Para mantener la suspensión de las partículas floculadas, debe implementarse mayor tiempo de mezcla, debido a que el flóculo es muy fuerte y la concentración de sólidos es alta [26].

En cuanto a la acción del coagulante en este caso el sulfato de aluminio, es el reaccionar con la alcalinidad natural del agua, para así lograr la formación de un flóculo de hidróxido de aluminio, que permita la eficiente remoción y sedimentación de los flóculos formados. [12].

- Gradiente de velocidad

Para lograr que la velocidad de aglomeración se de lo más rápido posible, es indispensable el aumento en el gradiente de velocidad.

A medida que los flóculos aumentan de tamaño, se incrementan también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico las cuales permiten que dos partículas entren en contacto en función de la diferencia de velocidad que existe en las zonas de fluido en que se encuentran, así estas fuerzas son inducidas por el mismo gradiente. [17], por lo tanto la permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados de baja eficiencia. [20]

La velocidad de la mezcla influye en la fuerza de las partículas para permanecer unidas. Si la velocidad de mezcla es muy alta, los flóculos pueden romperse, además la frecuencia en que se vuelvan a unir y conservar la fuerza inicial óptima, es muy esporádica. [19].

Cuando la velocidad de aglomeración de los flóculos sea superior, mayor es la velocidad de mezcla de la solución. [21]

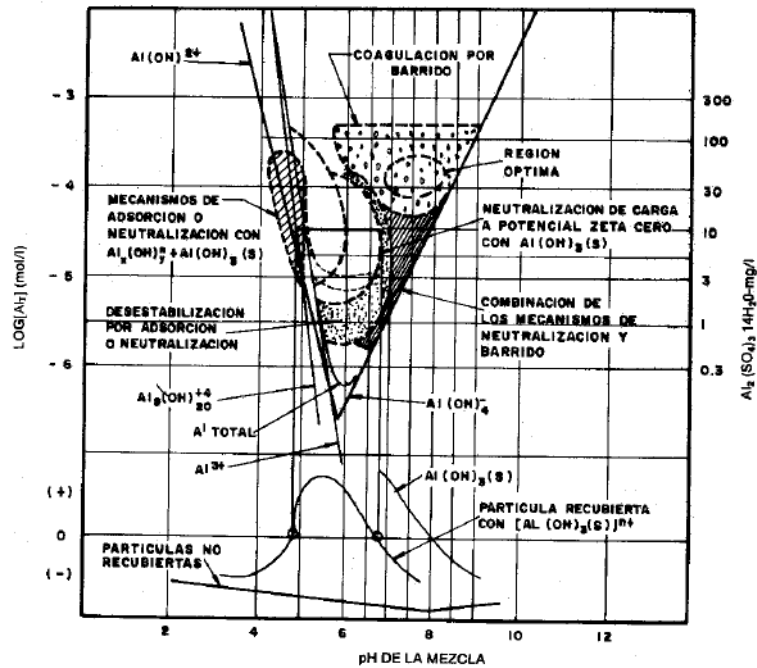
1.3 DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN

Relación entre el pH y la dosis de coagulante, por el cual se logra observar a manera gráfica las zonas óptimas de remoción de turbiedad, y además establecer qué tipo de coagulación es la que más se presenta. [28]

Además, se usan para predecir las dosis de coagulantes en función del pH y se desarrollan a partir de los diagramas de estabilidad termodinámica para la fase sólida del hidróxido de aluminio. [25]

Los resultados que se puedan obtener del análisis de parámetros físico-químicos, puede darse a conocer en los diagramas de coagulación, donde se representa de forma gráfica los datos obtenidos y es posible con este instrumento, pronosticar las condiciones químicas que validan el proceso; su función es la definición de dosis de coagulantes en función de los pH [25], todo esto mostrado en la gráfica 1. La acertada identificación de las características del coagulante para el tipo del agua analizada puede lograr un enfoque en la optimización en el proceso de coagulación. [29]

Figura 1. Diagrama de Coagulación.



Fuente. [28]

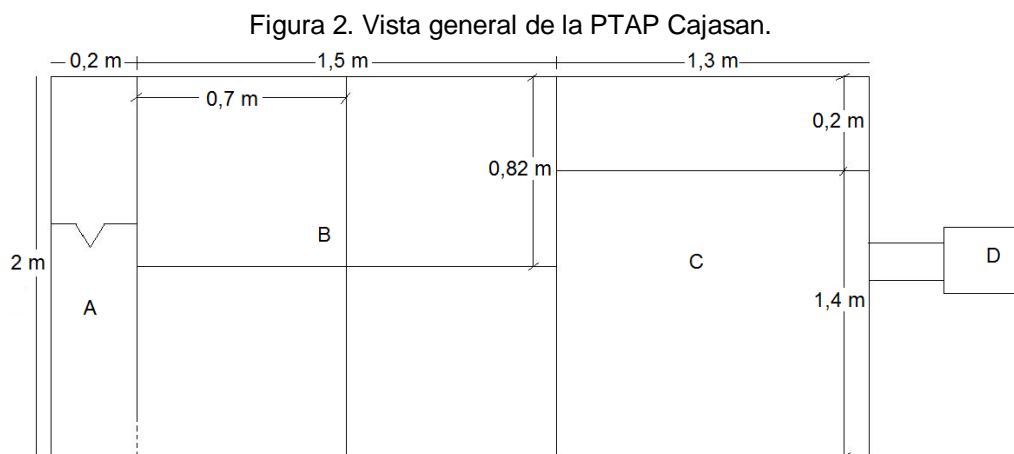
2. METODOLOGÍA

2.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE SEDE RECREATIVA CAJASAN CAMPOLAEGRE, PTAP Cajasan

La planta de Tratamiento de Agua Potable se encuentra ubicada en el kilómetro 13 en la vía que de Floridablanca conduce a Piedecuesta en las instalaciones de la sede recreativa. La toma de agua más frecuente de la planta es directamente de la Fuente I la cual es captada desde una bocatoma a una distancia de 2km con un caudal de 30L/min de manera constante si no existe inconvenientes con periodos de sequía en la zona. La Fuente II es utilizada como reservorio con una capacidad promedio de 100m³, agua tomada a un caudal de 20L/min.

La planta de tratamiento cuenta con mecanismos hidráulicos para el tratamiento del agua, estas partes se encuentran dimensionadas en la figura 2, además de la vista real de la planta en la figura 3, en los que se destacan:

- Para la Mezcla Rápida (A), una canaleta que provee la formación del resalto hidráulico para la mezcla del coagulante durante 2 minutos aproximadamente.
- El agua con sus partículas desestabilizadas, es conducida hacia 4 compartimientos de floculación externos (B) y 2 internos.
- Posteriormente, pasa el agua a sedimentación para decantar los lodos que se formaron en la floculación (C).
- Seguido a esto, el agua es conducida a clarificación en un filtro de arena (D), para finalmente ser conducida a cloración y almacenamiento.



Fuente. Autor.

Figura 3. Reconocimiento partes de la PTAP Cajasan



Fuente. Autor

El tratamiento del agua es realizado para abastecer el consumo de los empleados así como el funcionamiento de la sede, en cuanto al mantenimiento de piscinas, restaurante, baños, hotel y demás dependencias, logrando un volumen de agua tratada de aproximadamente 150m³ al día.

2.2 SELECCIÓN DE MUESTRAS

Según el objetivo que se planteó inicialmente el cuál corresponde a la identificación del comportamiento del agua en dos periodos de lluvia, las muestras fueron escogidas de dos fuentes de abastecimiento de la planta de tratamiento. Estas características principales de evaluación se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Criterios de selección de las muestras

DISTRIBUCIÓN	DESCRIPCIÓN
FUENTE I	Agua cruda Quebrada Mensuly
FUENTE II	Agua en almacenamiento
PERIODO I	Periodo de Transición que comprende los meses de Julio, Agosto y Septiembre.
PERIODO II	Periodo Lluvioso predominante en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre.

Fuente. Autor.

2.3 IDENTIFICACIÓN DE GRADIENTES

El desarrollo de la etapa de experimentación fue realizada en el Laboratorio de Agua Potable de la Universidad Pontificia Bolivariana, en los cuales se diseñó un plan de trabajo que comprendió el Análisis del Comportamiento de parámetros físico-químicos en el agua cruda, la construcción de Diagramas de Coagulación y la obtención de los gradientes y tiempos óptimos de coagulación y floculación.

Las muestras de agua en general fueron tomadas en el canal afluente a la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la Sede Recreacional Campoalegre Cajasan. Requiriéndose para el desarrollo de esta fase, 3 muestras diarias en este caso muestras provenientes tanto del afluente a la planta como de un tanque de almacenamiento destinado como reservorio, en total diariamente se procesaron 6 muestras de agua, a las que se caracterizó por parámetros físico-químicos como pH, Alcalinidad, Color y Turbiedad.

Estos parámetros fueron medidos mediante pruebas estándares (tabla 2) diseñadas por la Asociación Pública Americana para la Salud con sus siglas en inglés AWWA, además los equipos utilizados para la medición de las diferentes aspectos. [30]

Tabla 2. Equipos utilizados

Equipo utilizado	Parámetro
pHmetro Schott	pH
Turbidímetro Hach	Turbiedad
Colorímetro Hanna	Color
Reactor estático mecánico F6-300 300 Watt	Prueba de jarras (jar-test)

Fuente. Autor, [30]

2.4 COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA EN DOS PERIODOS DE LLUVIA.

Los ensayos realizados para los parámetros estudiados (pH, turbiedad, Alcalinidad y color), fueron posibles mediante la construcción de las cuatro combinaciones posibles, entre las fuentes I y II, y los periodos de lluvia I y II.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula que no existe diferencia significativa entre pares, se analiza el valor crítico de F para un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ (5%), con el 95% de confianza. Si el valor crítico obtenido de F es menor al valor de F crítico, la hipótesis no se rechaza, es decir no existe cambio significativo entre los factores, de lo contrario la hipótesis se rechaza. Las hipótesis formuladas son:

Ho: No existe diferencia significativa de las características evaluadas en los diferentes periodos de lluvia.

H1: Existe diferencia significativa de las características evaluadas en los diferentes periodos de lluvia.

El análisis estadístico escogido para el análisis de las muestras realizadas y el comportamiento de los parámetros en el tiempo es Análisis de varianzas (ANOVA) por comparación en pares, mediante los programas informáticos Microsoft Excel 2007 y GraphPad Prism 5.

El análisis fue realizado comparando las fuentes en cada periodo para identificar las diferencias significativas entre las características evaluadas y así determinar la influencia de los periodos de lluvia en la calidad del agua. La tabla 3 indica la división que se realizó para la mejor interpretación de los resultados en el análisis estadístico.

Tabla 3. Relación de grupos

PERIODO	FUENTES	CARACTERÍSTICAS EVALUADAS	ANÁLISIS
I	I	Turbiedad, Color, Alcalinidad, pH.	Grupo 1
	II		Grupo 2
II	I		Grupo 3
	II		Grupo 4

Fuente. Autor.

- Primera comparación.

Esta comparación fue realizada teniendo en cuenta el conjunto en primer lugar entre el Grupo 1 y el Grupo 2, además de la comparación entre el Grupo 3 y el Grupo 4.

En esta comparación se relacionaron las variables que lograron tener diferencias significativas en cuanto a las fuentes de abastecimiento, para así identificar qué factores son más relevantes en las fuentes analizadas. (anexo 2)

- Segunda comparación

Fue realizada para los Grupos 1 y 3 además de la comparación realizada para los Grupos 2 y 4, para la identificación final del periodo de lluvia que más afecte la calidad del agua. (anexo 2)

- Identificación de diferencias significativas

Esta identificación se realizó luego de las comparaciones anteriores para encontrar las diferencias significativas de los parámetros evaluados, además del ANOVA se realizaron gráficas de dispersión para confirmar estas diferencias encontradas.

2.5 CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE TURBIEDAD.

Los datos obtenidos para la construcción de los diagramas de coagulación se lograron a partir de ensayos de Pruebas de Jarras con la utilización de diferentes dosis de coagulante a la vez de modificadores de pH para la obtención de curvas de isoremoción de turbiedad, por tal motivo es necesaria la identificación de dos aspectos importantes. En primer lugar, el reconocimiento de los puntos correspondientes a la coagulación sin modificadores de pH y por otro lado la ubicación de puntos relacionados con las dosis de coagulantes presentes en el ensayo.

- Coagulación sin modificadores de pH

Para la obtención de esta curva, fue necesaria la previa identificación del comportamiento en este caso de la turbiedad durante toda la experiencia. Por tal motivo es indispensable la ubicación en un plano que muestre valores de pH para

diferentes dosis de coagulante empleados en la prueba. En primera instancia se identificó la curva sin modificador de pH con unas dosis de Sulfato de Aluminio de 6, 8, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 34, 40, 50 y 60 mg/l a una concentración de 0,8%, en un volumen de agua de 800ml por jarra.

- Determinación de los puntos (pH, Dosis)

Con la asignación de los puntos que se quieren evaluar, fue posible comprobar y visualizar las diferentes áreas en el diagrama. Por tal motivo, se realizó una dispersión homogénea de los puntos, donde se dispuso curvas a diferentes valores de pH y respectivamente con las dosis de coagulante suministradas.

Seguido a esto, se realizó la construcción de mallas de puntos de remoción de turbiedad pero modificando el pH con la utilización de acidificante o alcalinizante según se requiera.

Luego de identificados los puntos de pH y dosis de coagulante, se analizaron las zonas de mayor remoción de turbiedad y a que cantidades es más apropiado el funcionamiento de la planta en cuanto a dosificación de coagulantes y calidad final del agua.

2.6 DETERMINACIÓN DE LOS GRADIENTES Y TIEMPOS ÓPTIMOS DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

Luego de realizadas las etapas del comportamiento de agua y la construcción de diagramas de coagulación en dos periodos de lluvia se encontraron los parámetros óptimos de gradiente y tiempo en los que se debe llevar a cabo el proceso de coagulación (mezcla rápida) y el proceso de floculación (mezcla lenta) que garantice el buen funcionamiento de unidades posteriores (clarificación y filtración).

- Identificación de gradientes de mezcla rápida y lenta

Se realizaron diferentes comparaciones entre la eficiencia de porcentajes de turbiedad residual de la muestra para así determinar el gradiente óptimo de la mezcla experimental en la muestra de agua. Al hallar el gradiente óptimo se determinó la ecuación de Letterman, teniendo como referencia la ecuación 1.

$$G^n \times T = K$$

Ecuación 1.

Donde: G: Gradiente óptimo,
 T: tiempo de retención

Por otro lado, la implementación de la gráfica de porcentaje de turbiedad remanente vs gradiente de mezcla con sus respectivas series de tiempos de floculación (minutos), dió como resultado la obtención para cada gradiente el tiempo óptimo de floculación. Las constantes K y n fueron determinadas para cada uno de los gradientes óptimos definidos, así se obtuvo finalmente las características óptimas de remoción en el tratamiento del agua.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA EN DOS PERIODOS DE LLUVIA

- Primera comparación

Esta comparación fue realizada en una primera parte por el Grupo1-Grupo2 y en una segunda en Grupo 3-Grupo 4 arrojando los resultados expuestos en la tabla 4 y 5 respectivamente.

Tabla 4. Comparación grupos 1 y 2

<i>Grupos</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
pH FIPI	2,79125	3,874884
pH FIPII		
Turbiedad FIPI	2,950763	3,874884
Turbiedad FIPII		
Alcalinidad FIPI	0,838892	3,874884
Alcalinidad FIPII		
Color FIPI	6,407346	3,874884
Color FIPII		

Fuente. Autor.

Tabla 5. Comparación grupos 3 y 4

<i>Grupos</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
pH FIPII	0,65958	3,907782
pH FIPIII		
Turbiedad FIPII	4,140578	3,907782
Turbiedad FIPIII		
Alcalinidad FIPII	0,797842	3,907782
Alcalinidad FIPIII		
Color FIPII	0,132111	3,907782
Color FIPIII		

Fuente. Autor.

El comportamiento del agua es variable, puesto que cada periodo de lluvia afecta las diferentes características analizadas, entre las diferencias encontradas en el análisis estadístico están la Turbiedad, el Color y la Alcalinidad.

En cuanto al comportamiento de la turbiedad si existe diferencia significativa para el periodo lluvioso en las dos fuentes estudiadas. Esta combinación dio como resultado rechazar la hipótesis nula, puesto que se observa que el valor de F es mayor a 0,05, $4,14 > 3,9$, por tal motivo se concluye en este caso diferencias significativas en el Periodo Lluvioso en las dos fuentes. Por el contrario, en las demás combinaciones realizadas para la Turbiedad, cumplen de manera satisfactoria con la hipótesis nula. Este periodo de lluvia muestra que si existen cambios en la turbiedad, donde este aspecto aumenta con la lluvia al llevarse consigo el arrastre de partículas en la corriente de la fuente. Esto es afirmado por la dispersión de los datos que arrojó el programa estadístico, además que en la temporada de lluvias, el fraccionamiento de las rocas en mínimas partes por acción del golpe del agua hace que los sedimentos que bien se acumulen o sean arrastrados por la corriente aumenten. La variación se puede observar en la figura 4.

Por otro lado, no existe variación significativa de las fuentes en el Periodo de Transición, pero se confirma la hipótesis del aumento de la turbiedad en el agua cruda en la medida que la temporada de lluvia se acrecenta, esto debido a los muestreos realizados para el análisis del comportamiento, no es resultado del análisis de varianza. (anexo 2)

- Segunda comparación

Esta comparación fue realizada para la interpretación de datos proveniente de los conjuntos Grupo1-Grupo3 y Grupo 2-Grupo 4 para la identificación de las posibles diferencias significativas que puedan tener los parámetros estudiados respecto de los Periodos de lluvia establecidos. Los resultados que se obtuvieron están representados en la tabla 6 y 7.

Tabla 6. Comparación grupos 1 y 3

<i>Grupos</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
pH FIPI	1,846096	3,885279
pH FIPII		
Turbiedad FIPI	3,828375	3,885279
Turbiedad FIPII		
Alcalinidad FIPI	24,7847	3,885279
Alcalinidad FIPII		
Color FIPI	0,131002	3,885279
Color FIPII		

Fuente. Autor.

Tabla 7. Comparación grupos 2 y 4

<i>Grupos</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
pH FIPII	2,458082	3,886554
pH FIPII		
Turbiedad FIPII	0,159882	3,886554
Turbiedad FIPII		
Alcalinidad FIPII	32,3463	3,886554
Alcalinidad FIPII		
Color FIPII	5,087309	3,886554
Color FIPII		

Fuente. Autor.

En cuanto al comportamiento del parámetro Alcalinidad, las combinaciones FIPI-FIPII (tabla 6) y FIPII-FIPII (tabla 7), los valores calculados de F superan a 0,05, por tal motivo si existen diferencias significativas en las muestras realizadas.

En las combinaciones FIPI-FIPII (tabla 4) y FIPII-FIPII (tabla 5), no se rechaza la hipótesis nula, no existen diferencias significativas de las fuentes en el Periodo I, además del Periodo II en las fuentes.

En relación al comportamiento del Color en las muestras realizadas, en las combinaciones FIPI-FIPII (tabla 6) y FIPII-FIPII (tabla 5), no se encontraron diferencias significativas del comportamiento del parámetro en la Fuente I ni en el Periodo II. Por otro lado, en las combinaciones FIPII-FIPII (tabla 6) y FIPI-FIPII (tabla 3), si existen diferencias significativas, donde se ven afectados el color en la Fuente II y en el Periodo I.

La hipótesis nula es rechazada en la fuente II y en el periodo I, donde los niveles de color son más bajos que en las demás épocas de lluvia.

Del mismo modo, al observar la dispersión de los datos (figuras 5 y 6), es posible identificar la diferencia en la distribución de los valores de la Alcalinidad, afirmándolo aún más con el análisis de varianza.

Problemas en que puede incurrir un tipo de agua con alcalinidad alta para la salud humana, principalmente por el alto contenido de acidez la cual es generada por minerales disueltos que incrementan la turbiedad, también el hacer el agua corrosiva impide que la piel se hidrate, facilita el transporte de plomo si existe en la fuente poniendo de esta manera en peligro la salud humana. En contraste un agua con alta alcalinidad puede ayudar en la ingesta de calcio y magnesio, en valores requerido diariamente. La alcalinidad también está determinada por el suelo de la cuenca de la cual se capta el agua, puesto que los principales compuestos que afectan la alcalinidad son los carbonatos, bicarbonatos y compuestos de hidróxido, los cuales son la fuente principal de las rocas que allí se encuentran. [32]

- Identificación de diferencias significativas

Para la confirmación de las diferencias significativas encontradas se graficó a manera de dispersión los parámetros en donde surge variación, los cuales están representados con una mayor variación la Turbiedad (figura 4) y el Color (figuras 7 y 8).

Figura 4. Dispersión datos Grupo 3-Grupo 4 Turbiedad

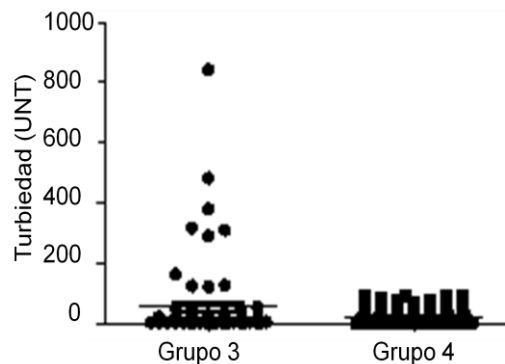


Figura 5. Dispersión datos Grupo 1-Grupo 3 Figura 6. Dispersión datos Grupo 2-Grupo 4
 Alcalinidad

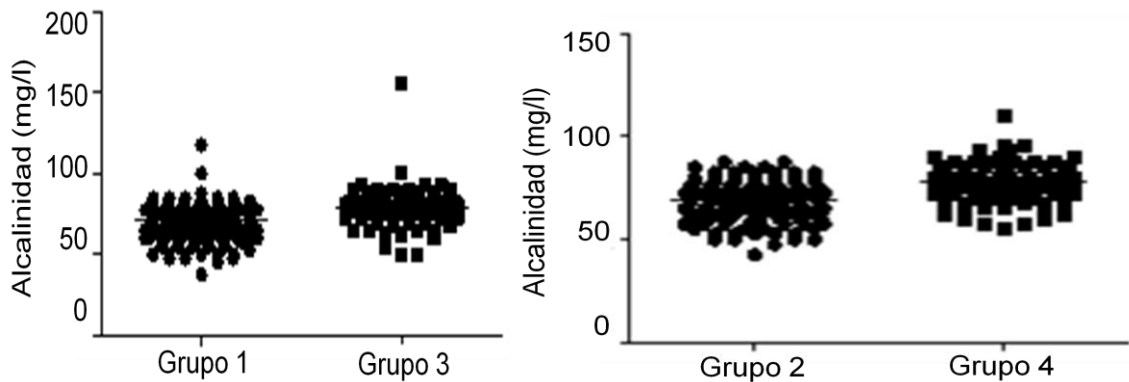
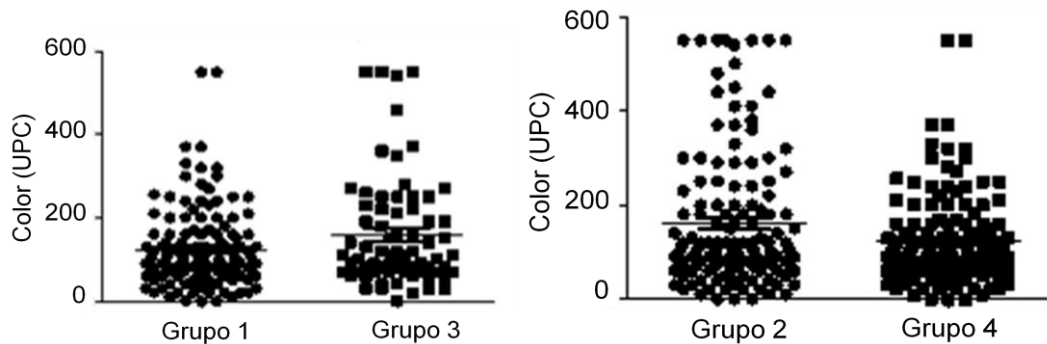


Figura 7. Dispersión datos Grupo 1-Grupo 3 Figura 8. Dispersión datos Grupo 2-Grupo 4
 Color



Las figuras 5 y 6, muestran que la variación en la alcalinidad es mínima, por tal motivo se comprueba que si no existe variación en el pH, la alcalinidad tampoco se ve afectada.

En otro aspecto relevante en el comportamiento del agua predominante en la planta es el color, donde los niveles de este aspecto se han visto afectados principalmente por las fuentes, donde se incrementa su valor en la fuente I respecto de la fuente II, valores de los cuales los valores máximos encontrados fueron de 550UPC y 370UPC respectivamente. Por lo tanto en la dispersión de los datos, es muy posible identificar la diferencia en la aglomeración de los datos en relación a las combinaciones (figuras 7 y 8).

De este modo, la diferencia encontrada en el análisis de varianza es lograda en las gráficas notándose la variación de aglomeración mayor en la combinación FIPI-FIPI (figura 8), donde los datos están un poco más distribuidos que en la combinación FIPI-FIPII (figura 7).

Existe diferencia significativa en la fuente II con respecto a los periodos, puede ser, porque al almacenarse el contenido de ácido húmicos y fúlvicos puede ser menor, y por tal motivo los valores bajos de color, con promedios entre 123 y 160 UPC. El alto contenido de color en el agua puede provocar, si este no es reducido, al ser mezclado con el cloro en la desinfección, la generación de Trihalometanos (THMs) los cuales al ser consumidos de manera continua pueden a largo plazo vincularse como agentes cancerígenos. [32]

En conclusión a las diferencias significativas encontradas, podría decirse que la distribución irregular en las precipitaciones ejerce un control en las concentraciones de los parámetros evaluados.

Los parámetros en los que se encontró diferencia significativa en el análisis efectuado fueron: turbiedad en el Periodo II, el cual puede estar influenciado por el arrastre de partículas y sedimentos, debido a la acción de la lluvia por el desgaste y disolución de rocas en la cuenca; en cuanto al color, la diferencia se dio en la Fuente II del Periodo I, el color es reducido en la época de periodo seco, además de la probable sedimentación de partículas en el tanque de almacenamiento lo cual reduce la concentración de color de manera superficial. Además para el análisis del color, debe tenerse en cuenta que el equipo de medición utilizado (Colorímetro Hanna) tiene un rango de medición de 10 en 10 UPC, donde el dato obtenido luego de la medición estaría en un rango de error del 10% y no se obtendría un valor cercano al real.

Es posible afirmar que el comportamiento del agua es similar, puesto que el parámetro más exigente para el tratamiento que es la Turbiedad, se ve influenciado por la lluvia, por tal motivo sus concentraciones antes de que algún evento de lluvia aparezca son normalmente bajas, lo que podría decirse que tiene un comportamiento asintótico.

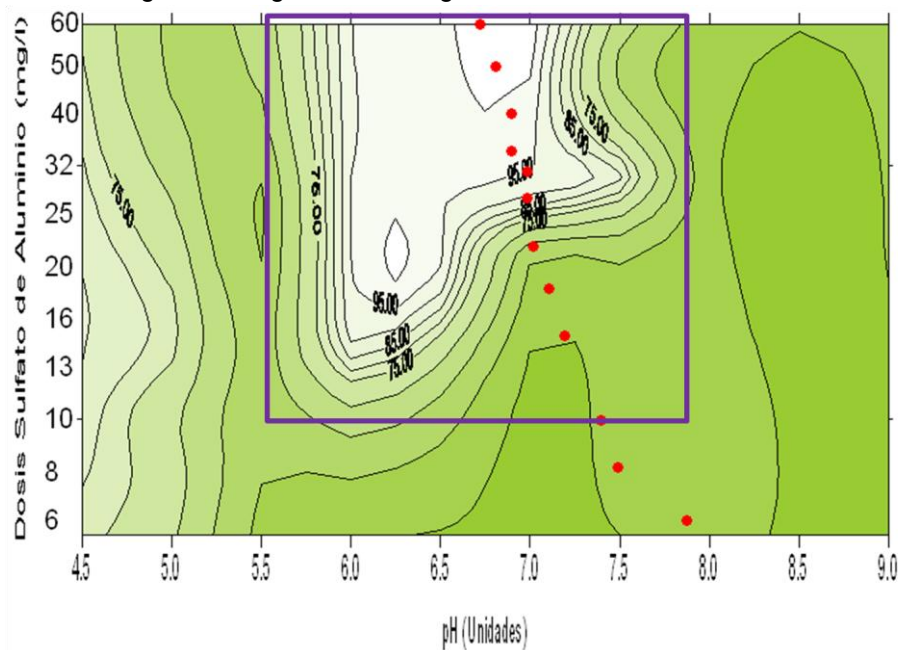
3.2 CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE TURBIEDAD

Los resultados obtenidos en la realización de diagramas de coagulación, tuvieron lugar a escala laboratorio, a la vez que fueron analizados los diferentes periodos de lluvia, donde es posible encontrar las zonas óptimas de remoción de turbiedad, además de sus características de pH y dosis de coagulante a utilizar. Se hizo indispensable el uso de un acidificante [31]

La construcción de los diagramas de coagulación se lograron utilizándose dosis de coagulante de 6, 8, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 34, 40, 50 y 60 mg/L y un rango de pH entre 4,5 y 9,0 unidades. El programa informático utilizado para tal fin fue Surfer versión 6,01. (anexo 3).

A continuación se muestran los diagramas de coagulación generados para los periodos de lluvia en evaluación.

Figura 9. Diagrama de Coagulación Periodo de Transición



Fuente. Autor.

3.2.1 Periodo de Transición

La curva punteada roja en la figura 9 muestra el comportamiento del agua sin modificación en el pH para el periodo de Transición, la cual está ubicada a pH alcalinos en un 60% de los datos.

Las curvas de isoremoción para la construcción de los diagramas para los dos periodos de lluvia, se realizaron en base a los datos obtenidos en relación a dosis de coagulante y pH corregidos, para la identificación de zonas óptimas de remoción de turbiedad.

Para la construcción del diagrama de coagulación (gráfica 2), se utilizó como coagulante Sulfato de Aluminio tipo B, con dosis entre 6 y 60 mg/l, a la vez que se modificó el pH con Ácido Clorhídrico (HCl 0,1N) y Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1N) para el caso del laboratorio, en la planta la utilización de Cloro gaseoso permite la reducción del pH en el momento de la coagulación para obtener las curvas de remoción en un rango de pH entre 4.5 y 9.0 unidades. (anexo 3)

Este periodo de lluvia comprende los meses de Julio, Agosto y Septiembre y en los cuales se realizó el diagrama de coagulación para encontrar las zonas óptimas de eficiencia del tratamiento en la planta.

En el Diagrama de Coagulación realizado para el Periodo de Transición (figura 9) fue posible deducir que al adicionar una dosis de coagulante de 25 mg/l, sin modificación de pH, se logra una remoción del 85%, pero se obtendría una mejor eficiencia si a esta dosis se modificara el pH, reduciéndolo aproximadamente en 0.7 unidades, llegando a una remoción del 95% en la turbiedad.

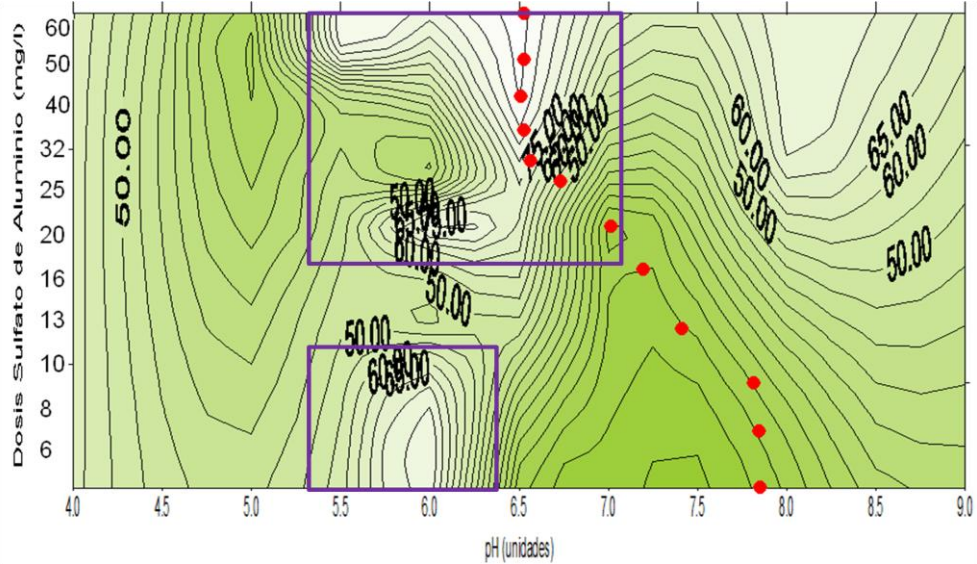
La zona descrita anteriormente es la enmarcada dentro del diagrama la cual pertenece al mecanismo de barrido por los niveles de pH logrados en la zona óptima, los que pueden estar en un rango de pH de 5,5 a 9,0 unidades, por tanto se comprueba que la turbiedad es removida a pH entre 6,0 y 7,0 cuando se trabaja con coagulantes de sales de Aluminio. [26]

Se recomienda entonces, la implementación de un coagulante acidificado, o de otra manera la adición de productos químicos al agua como acidificante como la adición de cloro gaseoso en la coagulación para la variación del pH de coagulación para la obtención de mejores resultados en el tratamiento. [31]

El diagrama construido para el Periodo de Transición, estuvo influenciado por la alta turbiedad inicial obtenida de 21,6UNT lo cual difiere en este aspecto con los diagramas construidos para el Periodo Lluvioso, puesto que en el Periodo Lluvioso se identificó que los eventos de lluvia tuvieron mayor duración y por el contrario en el Periodo de transición las precipitaciones ocurridas fueron breves.

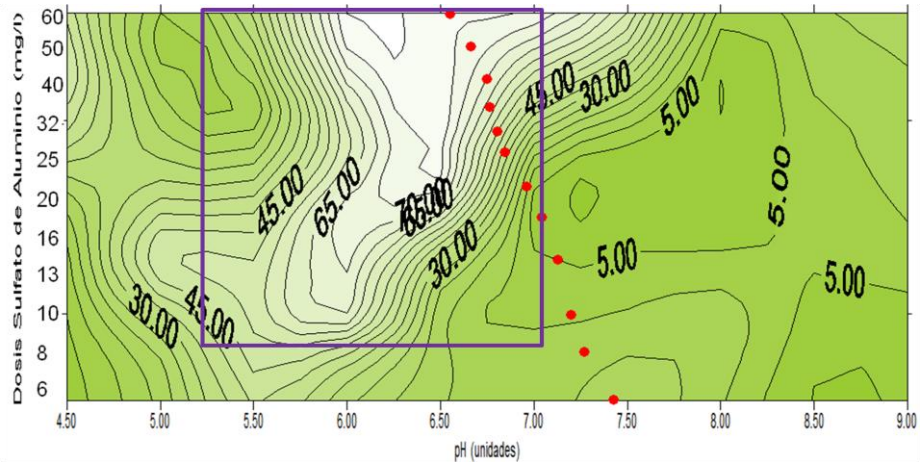
3.2.2 Periodo Lluvioso

Figura 10. Diagrama de Coagulación Periodo Lluvioso (1)



Fuente. Autor.

Figura 11. Diagrama de Coagulación Periodo Lluvioso (2)



Fuente. Autor.

Para el Periodo Lluvioso, se construyeron dos diagramas de coagulación estos representados en las figuras 10 y 11. Las curvas sin modificación de pH estuvieron comprendidas en su mayoría en pH alcalinos. En la figura 10, la curva sin

modificación se encuentra 6 puntos por debajo de un pH de 7 unidades, y por encima de una dosis de coagulante de 30mg/l.

En la figura 11, la curva punteada roja forma una tendencia lineal en la remoción de la turbiedad a medida que la dosis de coagulante aumenta.

En lo que tiene que ver con el Periodo Lluvioso (figura 10), la zona escogida como de la más baja turbiedad (cuadro inferior) se caracteriza porque la eficiencia en la remoción disminuye a medida que la dosis de coagulante aumenta, esto puede deducirse en que en esta zona ocurre probablemente reestabilización de los coloides, esto se logra por la adsorción en exceso por parte de los coloides de especies positivas hidrolizadas del aluminio, aumentando la turbiedad final, por lo tanto baja eficiencia en la coagulación.

En la segunda zona (cuadro superior), formada con dosis de 13 a 60mg/l y a pH de 5,5 a 7,0 mg/L, se logra ver de nuevo un pequeña zona de reestabilización de coloides, donde es visible el aumento en la turbiedad final a medida que la dosis se aumenta, esta zona se encuentra a dosis de 13 a 25mg/L, donde es observado el aumento en la remoción de turbiedad de 50 al 75% en el centro, equivalente a dosis de 20mg/L, y a partir de este valor se logra el aumento en la turbiedad hasta la dosis de 25 mg/L.

La dificultad con esta zona, es la lejanía de la curva sin modificación respecto de la zona de remoción. Para que esta zona sea implementada, se tendría que modificar el pH en un valor de 1,5 unidades, en comparación al manejo de la segunda zona mencionada, por consiguiente un mayor gasto en agente modificador.

La efectividad en el proceso, está influenciado por la utilización de modificadores de pH, el cual sirve como adaptador del nivel de pH inicial del agua a la vez que contribuye en la remoción de los niveles de turbiedad presentados.

A partir de de la dosis de 25mg/L, de nuevo empieza la remoción de la turbiedad de 50 a 85%, a medida que es aumentada la dosis del coagulante, logrando que las curvas queden abiertas y lográndose eficiencias mayores a mayores dosis.

En el segundo diagrama construido para periodo lluvioso (figura 11) la zona óptima de remoción se encuentra resaltada y aparece en un rango de pH comprendido entre 5,8 y 6,8, donde se logran las mayores eficiencias en cuanto a remoción, lo que indica luego de los ensayos logrados que el agua procedente de la quebrada Mensuly es de carácter ácido en su mayoría de veces, puesto que es

recomendable la modificación en el pH para la consecución de valores más óptimos en el tratamiento.

3.3 DETERMINACIÓN DE LOS GRADIENTES Y TIEMPOS ÓPTIMOS DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

3.3.1 Identificación de gradientes y tiempos de mezcla rápida

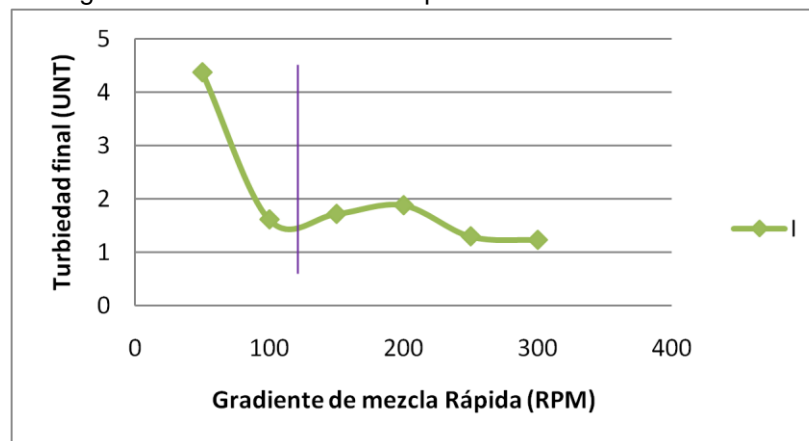
El gradiente mezcla rápido fue calculado mediante la identificación de parámetros de mezcla y caudal utilizado en la planta. El gradiente obtenido es de $586,758s^{-1}$, esto para la mezcla rápida con un caudal de 30L/min, que es el que frecuentemente es utilizado (fuente I). (Anexo 1)

Este gradiente de velocidad aproximado es generado en la mezcla rápida mediante un resalto hidráulico en la canaleta de entrada con donde es dosificado en una cantidad no establecida a medida que la turbiedad del agua aumenta.

Para la obtención de los gradientes óptimos de mezcla rápida se realizaron las figuras correspondientes a los dos periodos de lluvia, donde se analizó el comportamiento de la turbiedad al cambio en los gradientes de velocidad tanto en la coagulación como en la floculación. (anexo4)

Para los periodos de lluvia (figuras 12 y 13), se identificó la turbiedad final luego de ser sometida el agua a la variación en el gradiente de velocidad para diferenciar que gradiente es el más adecuado para la mezcla rápida.

Figura 12. Gradiente mezcla rápida en Periodo de Transición



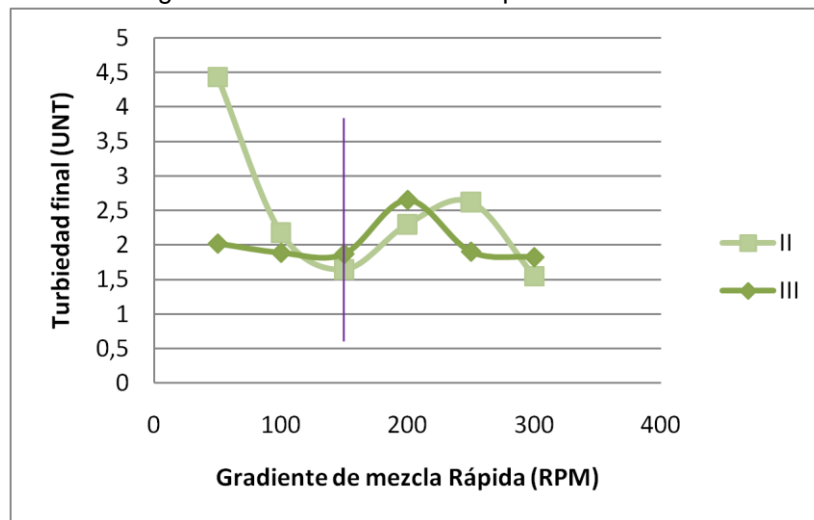
Fuente. Autor.

La experimentación para la identificación de gradiente óptimo de mezcla rápida (Coagulación) fue realizada teniendo en cuenta los valores de los tres ensayos realizados, correspondientes a 26 pruebas de jarras, a gradientes que van desde 50 a 300 RPM, todo esto para determinar el comportamiento de este en los dos periodos de lluvia a estudiarse. (anexo 4)

De acuerdo con el comportamiento presentado por el gradiente de velocidad de la figura 12 en el Periodo de Transición, se aprecia una tendencia en la disminución en el nivel de la turbiedad en 2,6 UNT, en la primera sección a un gradiente de 100RPM. También, existe una pequeña reestabilización en la turbiedad a medida que el gradiente es aumentado en 100RPM, a partir de contar con un gradiente de 200RPM la turbiedad se va haciendo asintótica, hasta el final de la experimentación a gradiente de 300RPM.

De la figura 12 se puede inferir que el gradiente óptimo para el Periodo de Transición es de aproximadamente de 250RPM, puesto que en este punto la tendencia asintótica se hace más visible además de que la turbiedad final de la muestra se hace menor.

Figura 13. Gradiente mezcla rápida en Periodo Lluvioso



Fuente. Autor.

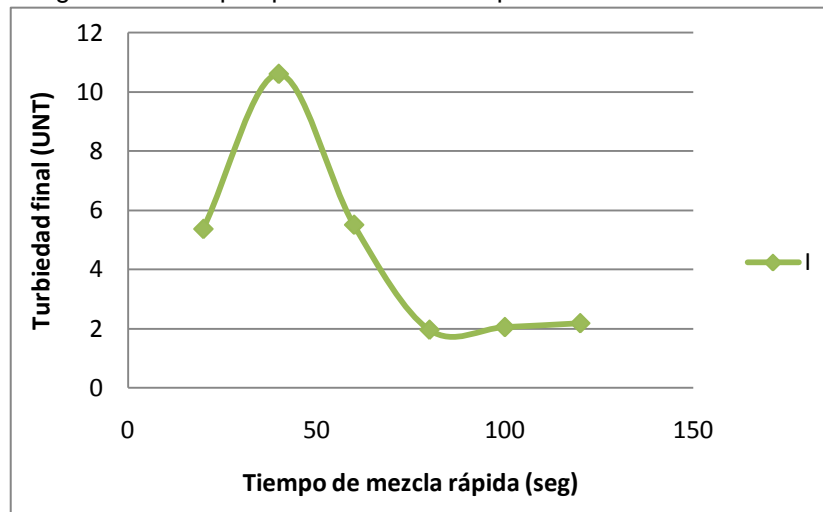
En cuanto al Periodo Lluvioso (figura 13), la conducta de la turbiedad no es muy semejante, puesto que la variación de los eventos de lluvia es inesperado y los niveles de turbiedad encontrados en el agua no siempre serán constantes. En la curva II, puede notarse la gran reducción de manera lineal de la turbiedad en

2,5UNT y notándose que a medida que el gradiente aumenta la eficiencia en la remoción es mayor. En contraste con la curva III, la remoción de turbiedad en este punto inicial hasta alcanzar un gradiente de 100RPM fue mínimo, esto además por la turbiedad inicial de 2UNT, cabe aclarar que este ensayo fue realizado a poco tiempo de que acabara el tiempo de lluvias en la zona y poco antes de que comenzará el periodo seco, por tal motivo el mínimo valor de la turbiedad.

A partir de un gradiente de 150RPM se nota la semejanza en el comportamiento en transición al aumento en el gradiente de velocidad, el aumento en la turbiedad en zonas de posible reestabilización, muestra que el aumentar el gradiente a 200RPM esta tendencia puede continuar, pero al continuarse después del gradiente de velocidad de 200RPM la turbiedad se va haciendo cada vez menor hasta lograr una estabilización en el valor encontrado de este.

Por otro lado, se tuvo en cuenta el tiempo más favorable para la realización de la coagulación, esto esta identificado en las figuras 14 y 15, las cuales se realizaron en la variación de tiempos de retención para asegurar una efectiva mezcla entre el agua y el coagulante.

Figura 14. Tiempo óptimo de mezcla rápida Periodo de Transición

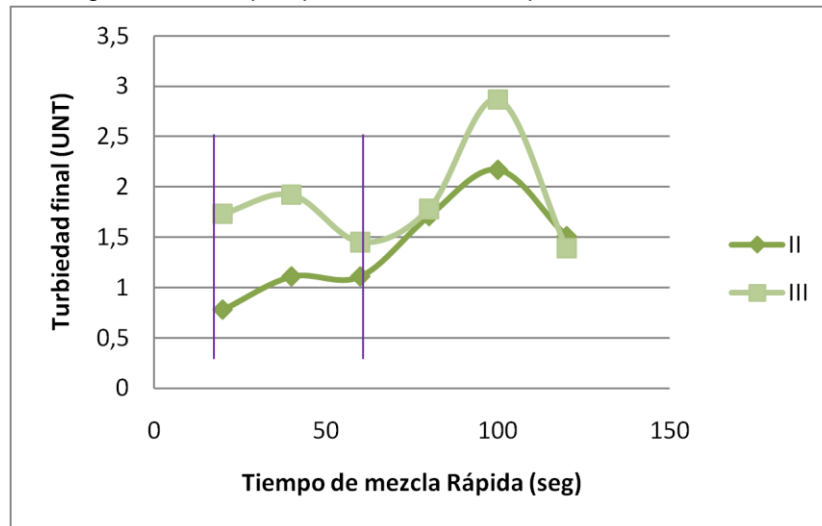


Fuente. Autor.

En el Periodo de Transición (figura 14), el tiempo se va haciendo óptimo a medida que aumenta, puesto que a partir de 40 segundos, la remoción en la turbiedad se hace efectiva, disminuyendo notablemente luego de transcurridos 40 segundos

más. En 100 segundos de mezcla rápida, se puede observar una pequeña reestabilización por el aumento en la turbiedad en 0,2 UNT.

Figura 15. Tiempo óptimo de mezcla rápida Periodo Lluvioso



Fuente. Autor.

En lo que tiene relación con el Periodo Lluvioso (figura 15), se nota que el tiempo de mezcla rápida entre mayor sea más óptimo resulta puesto que la turbiedad aumentó en las dos experiencias realizadas. En la curva II, se ve el aumento de la turbiedad a 20 y 60 segundos y la eficiencia en la remoción en 40 y 100 segundos de mezcla rápida. En la curva III el aumento de la turbiedad es más evidente, puesto que a medida que el tiempo de mezcla aumenta la turbiedad también, proceso en el cual debería ser mínimo. En 100 segundos la turbiedad residual empieza a descender de manera lineal.

Para este periodo el tiempo de mezcla óptimo esta dado en un rango de 40 a 60 segundos, puesto que en la curva II, el comportamiento de la turbiedad es decreciente y en la curva III la turbiedad permanece constante, lográndose una turbiedad final de 1,8 a 1,5UNT y 1,1UNT respectivamente.

La relación entre los dos periodos estudiados, está comprendida en el nivel de turbiedad inicial que mantenga el agua, puesto que en general el comportamiento de este parámetro es muy similar, a medida que el gradiente aumenta la remoción en la turbiedad también se hace mayor.

El gradiente de mezcla rápida óptimo encontrado en la experimentación para los dos periodos fue de $249s^{-1}$ (250RPM), siendo esta velocidad la que contribuye a

una estabilización de la turbiedad residual, haciéndose un valor constante este parámetro, de esta manera el gradiente de coagulación obtenido en el laboratorio (248s^{-1}) respecto del generado en la planta (586s^{-1}), es 338 unidades menor por tal motivo puede seguir manejándose ese gradiente puesto que se comprobó que a medida que los gradientes se aumentan las eficiencias en la desestabilización de los coloides es mayor, por tal motivo la remoción de la turbiedad es mayor.

3.3.2 Identificación de gradientes y tiempos de mezcla lenta

Se construyeron gráficas de relación entre gradiente de velocidad en floculación y turbiedad final obtenida para los dos periodos de lluvia estudiados. (anexo 5)

Las figuras 16 y 17 indican las condiciones logradas en la turbiedad para los gradientes observados, variando gradientes desde 5s^{-1} hasta 50s^{-1} .

Para el periodo de Transición la figura 16 permite identificar un rango de gradientes óptimos de mezcla lenta, obtenidos a escala laboratorio también para el cual se tuvo en cuenta el error proporcionado por el equipo de medición de turbiedad que es $\pm 0,02$.

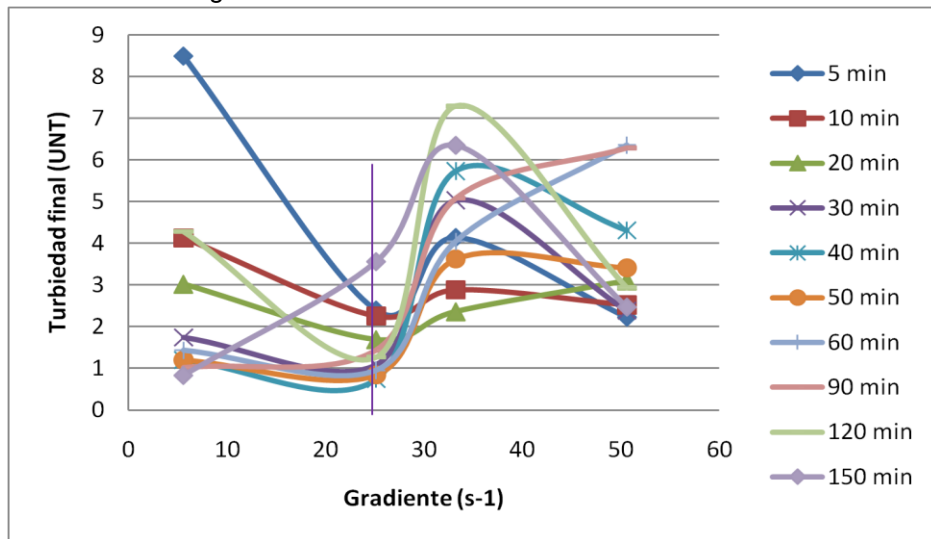
La figura 16 realizada para el Periodo de Transición, muestra la Turbiedad final del agua a gradientes y tiempos de mezcla lenta, implementado para el periodo de lluvia de Transición. En este caso, la investigación se realizó a gradientes de 12, 40, 50 y 70 RPM y los que corresponden a 5,58, 25,15, 33,23 y $50,62\text{ s}^{-1}$. (anexo 5)

Por medio de la gráfica se puede inferir que en el tiempo de mezcla lenta de 5 minutos, se observa una tendencia lineal del porcentaje de turbiedad remanente, haciéndose este parámetro cada vez menor hasta conseguir un gradiente de 25s^{-1} , lográndose una reducción en un rango del 92 al 28% de turbiedad.

Para los tiempos de mezcla de 10 y 20 minutos, el comportamiento de la turbiedad se hace paralelo, puesto que la reducción de la turbiedad es notablemente directa aproximadamente del 10%, siendo la más eficiente entre los dos tiempos, la curva generada a 20 minutos. Además, la remoción llega hasta el gradiente de 25s^{-1} , donde la turbiedad aumenta nuevamente hasta el gradiente de 32s^{-1} . En este punto las curvas se hacen contrarias en cuanto a la disminución de la turbiedad; a

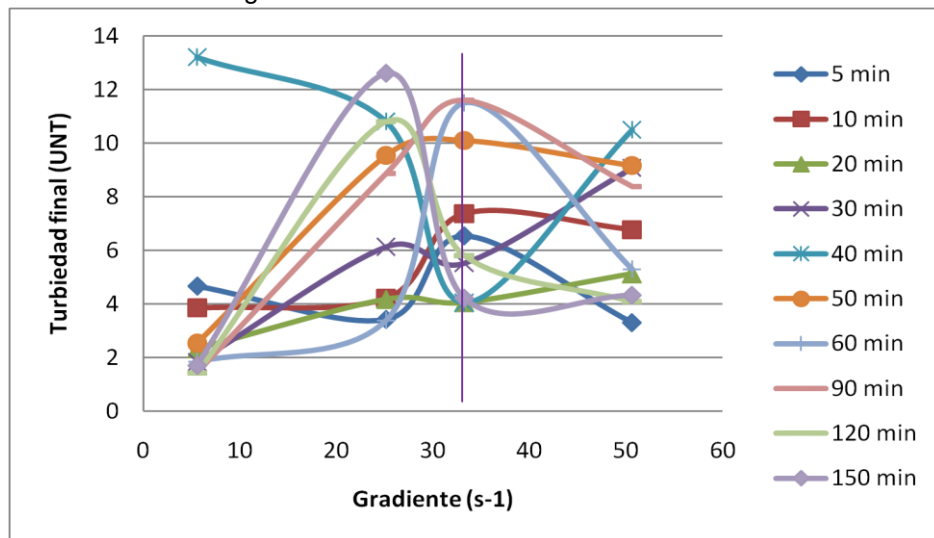
tiempo de mezcla lenta de 20 minutos, la turbiedad continúa aumentando hasta el gradiente de 50s^{-1} , y en el tiempo de 10 minutos la eficiencia en la remoción de la turbiedad es notoria y se observa la disminución de este parámetro en un 2%.

Figura 16. Turbiedad final Periodo de Transición



Fuente. Autor.

Figura 17. Turbiedad final Periodo Lluvioso



Fuente. Autor.

La figura 17, se realizó para muestras de agua obtenidas en periodo lluvioso, identificando el grupo de datos que están por encima de $R^2=0.98$, para tener más

certeza de las condiciones obtenidas son acordes a los parámetros establecidos para la evaluación.

Para el periodo Lluvioso (figura 17) la variación en la remoción de turbiedad es notoria, puesto que el rompimiento de los floculos aglutinados es evidente por el aumento en un amplio rango de la turbiedad. A tiempos de 150, 120, 60, 40 minutos, a medida que el gradiente aumenta el porcentaje de turbiedad remanente se incrementa hasta alcanzar un gradiente de $25s^{-1}$, punto donde se encuentra el mayor pico en la turbiedad. En contraste a los tiempos mencionados anteriormente, al ser reducido el tiempo de mezcla la variación en la turbiedad es menor, lo cual hace que el tratamiento sea más eficiente a gradientes bajos.

Es evidente que para cada tiempo de floculación existe un gradiente de velocidad medio, para este propósito se genera la gráfica que demuestra los gradientes medios para cada tiempo de mezcla en los dos periodos estudiados.

Debido a que el equipo de prueba de jarras no permite el aumento en el gradiente de velocidad a más de 300RPM, la identificación del gradiente mínimo de mezcla no fue logrado de una manera eficiente, puesto que por las tendencias que logran las gráficas este gradiente puede estar ubicado en valores mayores a 300RPM.

Las pruebas realizadas en el laboratorio fueron instauradas para la identificación del gradiente óptimo de floculación, pero en comparación con el gradiente calculado para la planta y con la calidad inicial del agua, el gradiente de floculación no influye de manera directa con la remoción de las partículas coloidales puesto que los niveles en la turbiedad de la planta son bajos, además lo que pueda removerse en la floculación puede ser reemplazado con la clarificación de la muestra logrando una mayor eficiencia en la remoción de las partículas coloidales.

3.3.3 Ecuación de Letterman [31]

Las ecuaciones presentadas surgen de la experimentación de la Floculación en los dos periodos de lluvia analizados, por tal motivo resultan un método eficaz para el cálculo del gradiente óptimo de Floculación al tiempo que se requiera.

La ecuación 2 está diseñada para calcular el Gradiente óptimo floculación específicamente para el Periodo de Transición, puesto que fue creada para las condiciones y comportamiento estudiados en este periodo. La ecuación 3 es el resultado de la experimentación para el Periodo Lluvioso teniendo en cuenta la

Turbiedad inicial del agua. La ecuación se puede utilizar para niveles de turbiedad altos.

$$G^{-3,2422} \times T = \mathbf{146,63}$$

Ecuación 2

$$G^{-2,5611} \times T = \mathbf{129,62}$$

Ecuación 3

En la mezcla lenta el gradiente de velocidad calculado es de $26,6s^{-1}$ con un tiempo de retención en la unidad de 52 minutos, puesto que no se cuenta con la información debida de las características propias de la planta de Tratamiento.

El desarrollo de las ecuaciones de Letterman arrojan los siguientes resultados con un tiempo de retención de 52 minutos: para el Periodo de Transición el gradiente de velocidad calculado es de $2,68s^{-1}$ con un tiempo de retención de 54 minutos; por otro lado, para el Periodo Lluvioso el gradiente obtenido fue de $3,66s^{-1}$ con un tiempo de retención de 35 minutos.

La identificación del comportamiento del gradiente óptimo de mezcla para un tiempo de floculación encontrado en la planta, se hizo realizando ensayos a gradiente mayores de $5s^{-1}$ para comprobar la eficiencia del gradiente de mezcla lenta en la planta relacionado con el obtenido en el desarrollo de las ecuaciones 2 y 3; no se pudo comprobar el gradiente mínimo de floculación porque el equipo utilizado para la realización de las pruebas de jarras no funciona a gradientes menores de $5s^{-1}$, porque a valores menores de este es posible encontrar el gradiente donde no ocurre floculación.

Se realizaron diferentes comparaciones entre la eficiencia de porcentajes de turbiedad residual de la muestra para así determinar el gradiente óptimo de la mezcla experimental en la muestra de agua.

La escogencia del tiempo de floculación está influenciada por las pruebas realizadas para la identificación del gradiente óptimo, el cual este tiempo no puede estar por encima o por debajo del óptimo porque se altera la aglomeración de los flóculos [21]. El tiempo óptimo logrado en el laboratorio fue de 40 minutos para el Periodo de Transición y entre 120 y 150 minutos para el Periodo Lluvioso. Los valores obtenidos para la realización de las ecuaciones anteriormente mencionadas, para el mecanismo de barrido el cual es el predominante en el

tratamiento del agua, donde se manejaron valores de turbiedad variables y así concluir con el tiempo óptimo de mezcla lenta.

El tiempo de retención de la planta calculado es de 52 minutos, con este tiempo se comparó el gradiente que es mantenido en la planta y el gradiente calculado mediante las ecuaciones obtenidas de Letterman. Para la planta el gradiente obtenido es de $26,6s^{-1}$, con los cálculos realizados para el periodo de transición y el periodo lluvioso de $26,68s^{-1}$ y $3,66s^{-1}$ respectivamente.

El tratamiento del agua en el periodo de transición puede mantenerse el gradiente de la planta debido a la comparación de gradientes no existe diferencia por el valor de gradiente obtenido es igual en la ecuación desarrollada y en la planta; para el periodo lluvioso el gradiente óptimo es el resultante de la ecuación de Letterman con una reducción significativa del gradiente por lo cual se afirma que a menores gradientes de velocidad la eficiencia en la aglutinación de partículas coloidales desestabilizadas es más alta.

4. CONCLUSIONES

- La Turbiedad se ve afectada por el número e intensidad de eventos de lluvia presentados en la zona de captación, esto debido al aumento de partículas disueltas probablemente por el desprendimiento de sedimentos arrastrados por la corriente de agua en la aducción.
- El pH y la alcalinidad de las fuentes analizadas no se ve afectado por las condiciones de lluvia porque el comportamiento de este parámetro es similar en los periodos analizados.
- Con respecto al parámetro de color se encontró un mayor nivel de color en la fuente I esto debido a que se encuentra una mayor presencia de material diferente a lo encontrado en la fuente II seguramente porque las partículas encontradas se encuentran sedimentadas.
- La evaluación de los diagramas de coagulación construidos para los dos periodos de lluvia estudiados presentan un comportamiento similar en lo que corresponde la dosificación del coagulante y la modificación en el pH, dado que el parámetro que se tiene en cuenta para realizar los análisis de los resultados son congruentes en lo observado, la única variante es el nivel de Turbiedad inicial.
- Para la Coagulación el gradiente óptimo obtenido en el laboratorio fue menor respecto del calculado para la planta, por tal motivo la implementación del gradiente de la planta de tratamiento es el óptimo porque contribuye una mayor formación de flóculos en respuesta a lo encontrado en literatura a gradientes más altos el proceso será más eficiente [25].
- El gradiente óptimo de floculación obtenido mediante la aplicación de la ecuación de Letterman aplicado en el sistema de análisis utilizado para los datos logrados en el laboratorio y comparado con el utilizado en la planta permite concluir que el gradiente calculado en la planta es efectivo para el periodo de transición porque no se encontró variación en el gradiente, para el periodo lluvioso el gradiente óptimo es el resultado de la aplicación de la ecuación de Letterman porque el valor de gradiente es menor al calculado

para la planta y para este proceso gradientes bajos son más efectivos en la aglutinación de partículas.

5. RECOMENDACIONES

- Cambiar el Policloruro de Aluminio PAC como coagulante por el Sulfato de Aluminio, puesto que es de fácil ubicación, no es tóxico, no produce incrustaciones ni corrosión en las tuberías, es eficiente, su manejo y utilización no es peligroso y de cuidado como el Policloruro de Aluminio.
- Garantizar que el tiempo de duración del agua en el floculador sea idóneo para conseguir que los flóculos se formen con el tamaño ideal y peso adecuado, esto dado por la dosis de coagulante suministrado, el gradiente de velocidad y el tiempo de mezcla lenta.
- Aumentar el tiempo de retención del agua en la unidad de floculación para lograr una mayor eficiencia en esta

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. ---. Estudio de Tratabilidad para el arranque de la planta de potabilización Vista Hermosa - EMCALI E.I.C.E E.S.P. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR). Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. Departamento de Producción de la Dirección de Agua Potable –Emcali. 2006
- [2]. ---. Estudios para evaluación de riesgos sanitarios, adsorción con carbón activado y optimización de procesos de las plantas de potabilización de EMCALI E.I.C.E E.S.P. abastecidas por el Río Cauca. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR). Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. Departamento de Producción de la Dirección de Agua Potable –Emcali. 2005
- [3]. GIRONZA VARGAS, Freddy. GÓMEZ ORTÍZ, Angélica. Optimización del proceso de coagulación mediante la construcción de diagramas de coagulación. Caso Planta Río Cali. Trabajo de Grado Ingeniero Sanitario. Santiago de Cali. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente. 2007.
- [4]. FRANCESCHI, M. GIROU, A. CARRO-DIAZ, A.M. MAURETTE, M.T. PUECH-COSTES, E. Optimisation of the coagulation–flocculation process of raw water by optimal design method. Water Research. Vol 32. [en línea]. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V73-45C1P9R-8&_user=2620291&_coverDate=08%2F31%2F2002&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000058185&_version=1&_urlVersion=0&_userid=2620291&md5=34277e82ef156fc0d24a5de9418c09e1> [citado en enero 5 de 2010]
- [5]. CERÓN VIVAS, Alexandra. Manual de Laboratorio de Tratamiento de Agua Potable. Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. División Editorial y de Publicaciones UIS. Primera edición. 2007.
- [6]. GRAY, N.F. Calidad del agua Potable. Problemas y soluciones. Editorial Acibia. 1996.

- [7]. AZIZ, Hamidi Abdul. SALIA ALIAS, Mohd. NORDIN ADLAN, Faridah. A.H. ASAARI, Mohd. SHAHRIR, Zahari. Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. Universiti Sains Malaysia. Bioresource Technology. Science Direct. 2005
- [8]. ---. Coagulación. Acueductos y Alcantarillados. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.[en línea]. Disponible en <[http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas\(b\)_continuacion.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas(b)_continuacion.htm)> [citado en enero 12 de 2010]
- [9] PÉREZ, José M. Estado del arte – Coagulación. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- [10] BIRCH, S. DONAHUE, R. BIGGAR, K.W. SEGO, D.C. Prediction of flow rates for potable water supply from directionally drilled horizontal wells in river sediments. Journal of Environmental Engineering & Science. Vol. 6. 2007.
- [11] ZAMFIROIU, E. MASU, S. Aspects Regarding the Efficiency of Coagulation Process for Some Surface Waters. Boletín científico de la Universidad Politécnica de Timișoara Rumania. Volumen 52. 2007
- [12] ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Calidad del agua. Primera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 2002
- [13] PERNITSKY, David J. Selection Guidelines for Drinking Water Coagulation. 2008.
- [14] ---. Coagulación y Floculación de contaminantes del agua. [en línea]. Disponible en <<http://cabierta.uchile.cl/revista/15/articulos/pdf/edu4.pdf>> [citado en 1 de diciembre de 2009]
- [15] MEDEMA, G. J, et al. Safe drinking water: an ongoing challenge. [en línea]. Disponible en <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/9241546301_chap1.pdf> [citado en enero 12 de 2010]

[16] PÉREZ, J.M; CÁNEPA DE VARGAS, L.M; RICHTER, C. Coagulación. [en línea]. Disponible en <http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/3938/5/BVCI00033_03_3.pdf> [citado en 12 de noviembre de 2009]

[17] CÁNEPA DE VARGAS, Lidia. MALDONADO, Víctor. BARRENECHEA, Ada. AURAZO, Margarita. Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. CEPIS. 2004 [en línea]. Disponible en < >. [Citado en septiembre 3 de 2009].

[18] ---. Turbidity through the treatment processes. EPA Guidance Manual. Abril 1999. [en línea]. Disponible en <http://www.epa.gov/safewater/mdbp/pdf/turbidity/chap_10.pdf> [citado en 12 de noviembre de 2009]

[19] KEMMER, Frank N. McCALLION, John. Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Tomo I. Editorial Mc Graw Hill. 1993.

[20] GÓMEZ PUENTES, Néstor Alejandro. Remoción de Materia Orgánica por Coagulación – Floculación. Manizales, 2005. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. [en línea]. Disponible en <<http://www.digital.unal.edu.co/dspace/bitstream/10245/1511/1/nestoralejandromezpuentes.2005.pdf>> [citado en diciembre 19 de 2009]

[21] ---. Manual de potabilización del agua. Tercera edición. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas.

[22] SANDOVAL et al. Potencial Zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [en línea]. Disponible en <<http://www.elaguapotable.com/POTENCIAL%20ZETA%20COMO%20UNA%20HERRAMIENTA%20PARA%20DETERMINAR%20LA.pdf>> [citado en 14 de enero de 2010]

[23] DE ZUANE, John. Handbook of drinking water quality.

[24] ZETA METER. Coagulation & Flocculation. [en línea] Disponible en <<http://www.zeta-meter.com/coag.pdf>> [citado en enero 15]

- [25] ARBOLEDA VALENCIA, J. Teoría y práctica de la Purificación del agua. Acodal. 1992.
- [26] SPELLMAN, Frank R. DRINAN, Joanne. Manual del Agua Potable. Editorial Acribia. 2000.
- [27] ---. Tecnologías. Academia nacional de ciencias. [en línea] Disponible en <<http://www.drinking-water.org/html/es/Treatment/Filtration-Systems-technologies.html> 2008> [citado en marzo 3 de 2010]
- [28] ---. Mecanismos de coagulación. [en línea]. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/025022/cap2.pdf>> [citado en 1 de diciembre de 2009]
- [29] MATILAINEN, Anu. Removal of the Natural Organic Matter in the different stages of the Drinking Water Treatment Process. Universidad de Tecnología Tampere. Publicación 651. 2007.
- [30] AWWA. Métodos normalizados: para el análisis de aguas potables y residuales. American Public Health Association. American Water Works Association. Water Pollution Control Federation. Editorial Díaz de santos. 1992.
- [31] DI-BERNARDO, Luiz. DI-BERNARDO DANTAS, Angela. Métodos e técnicas de Tratamento de água. Volumen 1. Segunda edición. Editorial Rima. 2005.
- [32] ---. Hardwater, water hardness. Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences. Wilkes University. [en línea]. Disponible en < <http://www.water-research.net/hardness.htm>> citado en [febrero 22 de 2010]

ANEXOS

1. Cálculo de gradiente de velocidad para coagulación y floculación.

1.1 Coagulación: con caudal de 30L/min=0.0005 m³/s

$$q = \frac{Q}{B} \quad \text{Donde: } Q: \text{caudal (m}^3/\text{s)} \\ B: \text{ancho del canal (m)}$$

$$q = \frac{0.0005 \text{ m}^3/\text{s}}{0.2 \text{ m}} = 0.0025 \frac{\text{m}^3}{\text{sm}}$$

Longitud del resalto:

$$L = 6(h_2 - h_1) \quad \text{Donde, } h_2: \text{altura lámina de agua antes del resalto} \\ h_1: \text{altura lámina de agua después del resalto}$$

$$L = 6(0,5\text{m} - 0,1\text{m}) = 2,4\text{m}$$

Tiempo de mezcla:

$$T = \frac{L}{v_2} \quad T = \frac{2,4\text{m}}{0,5\text{m/s}} = 4,80\text{s}$$

Gradiente de velocidad:

4 Perdida por fricción en el canal

$$H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} \quad H = \frac{(0,5\text{m} - 0,1\text{m})^3}{4 * 0,1\text{m} * 0,5\text{m}} = 0,32\text{m}$$

$$G = \frac{\gamma h}{\mu t}$$

Donde, G: Gradiente de mezcla rápida (s^{-1})
 γ : Peso específico del agua
 μ : viscosidad cinemática a 25°

$$G = \frac{9.786 * 0.32}{1.102 \times 10^{-3} * 4.80} = 592.014s^{-1}$$

1.2 Floculación

$$v = \frac{Q}{A} \qquad v = \frac{5 \times 10^{-4} m^3/s}{0.04 m^2} = 0,0125 m/s$$

$$Rh = \frac{Am}{Pm} \text{ (figura2)} \qquad Rh = \frac{0,04 m^2}{0,8 m} = 0,05 m$$

$$G = \sqrt{\frac{f * v^3}{8 * Rh * \gamma}} \qquad G = \sqrt{\frac{0.013 * (0.0125 m/s)^3}{8 * 0,05 m * 0,893 \times 10^{-6} \frac{m}{s}}} = 26,6 s^{-1}$$

2. Porcentaje de ocurrencia de variables medidas

TURBIEDAD								
	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
Clase	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia
0	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
3	2	1,39%	0	0,00%	2	2,78%	0	0,00%
5	11	7,64%	14	10,14%	4	5,56%	13	18,06%
7	18	12,50%	15	10,87%	9	12,50%	11	15,28%
10	26	18,06%	28	20,29%	15	20,83%	6	8,33%
15	22	15,28%	27	19,57%	14	19,44%	12	16,67%
20	15	10,42%	11	7,97%	9	12,50%	3	4,17%
25	9	6,25%	9	6,52%	3	4,17%	2	2,78%
30	3	2,08%	13	9,42%	1	1,39%	5	6,94%
40	6	4,17%	7	5,07%	1	1,39%	8	11,11%
50	8	5,56%	7	5,07%	2	2,78%	1	1,39%
60	7	4,86%	3	2,17%	2	2,78%	1	1,39%
70	4	2,78%	2	1,45%	0	0,00%	2	2,78%
100	4	2,78%	0	0,00%	0	0,00%	8	11,11%
200	5	3,47%	0	0,00%	4	5,56%	0	0,00%
300	3	2,08%	1	0,72%	1	1,39%	0	0,00%
400	0	0,00%	0	0,00%	3	4,17%	0	0,00%
	1	0,69%	1	0,72%	2	2,78%	0	0,00%
Total	144	100,00%	138	100,00%	72	100,00%	72	100,00%

ALCALINIDAD								
Clase	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia
30	0	0,00%	2	1,45%	0	0,00%	0	0,00%
40	1	0,69%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
50	11	7,64%	6	4,35%	2	2,78%	0	0,00%
60	11	7,64%	19	13,77%	1	1,39%	4	5,56%
70	43	29,86%	33	23,91%	10	13,89%	10	13,89%
80	51	35,42%	63	45,65%	19	26,39%	29	40,28%
90	25	17,36%	15	10,87%	32	44,44%	22	30,56%
100	1	0,69%	0	0,00%	7	9,72%	6	8,33%
120	1	0,69%	0	0,00%	0	0,00%	1	1,39%
	0	0,00%	0	0,00%	1	1,39%	0	0,00%
Total	144	100,00%	138	100,00%	72	100,00%	72	100,00%

COLOR								
Clase	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia
0	3	2,08%	3	2,17%	1	1,39%	1	1,39%
10	3	2,08%	2	1,45%	0	0,00%	0	0,00%
20	5	3,47%	7	5,07%	4	5,56%	1	1,39%
30	6	4,17%	5	3,62%	2	2,78%	4	5,56%
40	5	3,47%	4	2,90%	0	0,00%	2	2,78%
50	4	2,78%	5	3,62%	2	2,78%	0	0,00%
60	7	4,86%	8	5,80%	3	4,17%	5	6,94%
70	11	7,64%	13	9,42%	5	6,94%	8	11,11%
100	28	19,44%	28	20,29%	22	30,56%	13	18,06%
130	19	13,19%	22	15,94%	8	11,11%	8	11,11%
160	7	4,86%	11	7,97%	9	12,50%	6	8,33%
200	11	7,64%	8	5,80%	0	0,00%	4	5,56%
240	4	2,78%	7	5,07%	2	2,78%	4	5,56%
280	4	2,78%	5	3,62%	1	1,39%	8	11,11%
320	7	4,86%	4	2,90%	1	1,39%	0	0,00%
360	2	1,39%	1	0,72%	2	2,78%	2	2,78%
400	3	2,08%	2	1,45%	0	0,00%	1	1,39%
500	7	4,86%	0	0,00%	0	0,00%	1	1,39%
550	8	5,56%	2	1,45%	10	13,89%	4	5,56%
	0	0,00%	1	0,72%	0	0,00%	0	0,00%
Total	144	100,00%	138	100,00%	72	100,00%		100,00%

pH								
	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
Clase	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia
7	0	0,00%	2	1,45%	1	1,39%	0	0,00%
7,5	7	4,86%	7	5,07%	0	0,00%	1	1,39%
8	86	59,72%	101	73,19%	40	55,56%	44	61,11%
8,1	29	20,14%	22	15,94%	16	22,22%	19	26,39%
8,2	17	11,81%	4	2,90%	7	9,72%	5	6,94%
8,3	3	2,08%	1	0,72%	5	6,94%	3	4,17%
8,4	1	0,69%	1	0,72%	1	1,39%	0	0,00%
8,6	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
9	1	0,69%	0	0,00%	1	1,39%	0	0,00%
	0	0,00%	0	0,00%	1	1,39%	0	0,00%
Total	144	100,00%	138	100,00%	72	100,00%	72	100,00%

3. Frecuencia de ocurrencia de la Turbiedad, pH, porcentaje de Remoción para la construcción de Diagramas de Coagulación.

TURBIEDAD						
Periodo de Transición			Periodo Lluvioso			
			1		2	
Clases	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia
1,5	17	23,94%	28	33,73%	11	15,49%
2	5	7,04%	6	7,23%	5	7,04%
2,5	3	4,23%	3	3,61%	5	7,04%
3	1	1,41%	9	10,84%	1	1,41%
3,4	6	8,45%	21	25,30%	8	11,27%
4	5	7,04%	16	19,28%	14	19,72%
4,5	7	9,86%	0	0,00%	27	38,03%
5	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
	27	38,03%	0	0,00%	0	0,00%
Total	71	100,00%	83	100,00%	71	100,00%

% de Remoción						
Periodo de Transición			Periodo Lluvioso			
			1		2	
Clases	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% acumulado
10	13	18,31%	25	30,12%	24	33,80%
20	7	9,86%	17	20,48%	15	21,13%
30	3	4,23%	4	4,82%	7	9,86%
40	2	2,82%	2	2,41%	4	5,63%
50	2	2,82%	3	3,61%	4	5,63%
60	0	0,00%	5	6,02%	6	8,45%
70	0	0,00%	3	3,61%	4	5,63%
80	18	25,35%	11	13,25%	7	9,86%
90	10	14,08%	13	15,66%	0	0,00%
100	16	22,54%	0	0,00%	0	0,00%
Total	71	100,00%	83	100,00%	71	100,00%

pH						
Periodo de Transición			Periodo Lluvioso			
			1		2	
Clases	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia	Frecuencia	% ocurrencia
5,5	21	29,58%	15	18,07%	24	33,80%
6	16	22,54%	7	8,43%	8	11,27%
6,5	16	22,54%	18	21,69%	4	5,63%
7	7	9,86%	15	18,07%	6	8,45%
7,5	2	2,82%	9	10,84%	2	2,82%
8	2	2,82%	6	7,23%	8	11,27%
8,5	1	1,41%	5	6,02%	9	12,68%
9	0	0,00%	7	8,43%	5	7,04%
10	0	0,00%	1	1,20%	5	7,04%
11	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
12	3	4,23%	0	0,00%	0	0,00%
13	1	1,41%	0	0,00%	0	0,00%
	2	2,82%	0	0,00%	0	0,00%
Total	71	100,00%	83	100,00%	71	100,00%

4. Turbiedad Final para pruebas de Mezcla Rápida.

	Periodo Transición		Periodo Lluvioso			
			1		2	
	Turbiedad Final					
Mezcla Rápida (RPM)	Dosis de coagulante 22mg/l	Dosis de coagulante 18mg/l	Dosis de coagulante 22mg/l	Dosis de coagulante 18mg/l	Dosis de coagulante 22mg/l	Dosis de coagulante 18mg/l
300	1,23	5,6	1,54	3	1,82	9,42
250	1,3	4,41	2,62	3,7	1,9	9,47
200	1,88	5,37	2,29	3,3	2,65	4,85
150	1,72	5,22	1,64	3,1	1,87	5,13
100	1,61	1,67	2,17	3,71	1,88	4,87
50	4,37	4,35	4,43	7,9	2,02	4,91

5. Turbiedad Final para pruebas de Mezcla Lenta.

PERIODO DE TRANSICIÓN				
Gradiente (s^{-1})	5.5836	25.1487	33.2393	50.6189
Tiempo (min)	Turbiedad Remanente (%)			
5	93.6053	26.4609	45.6450	24.5865
10	45.5347	24.8071	31.7530	27.7839
20	33.2966	18.6329	26.0198	34.1786
30	19.1841	11.9074	55.4576	26.2404
40	13.2304	8.1588	63.1753	47.5193
50	13.2304	9.2613	39.9118	37.5965
60	15.7663	10.4741	44.5424	70.0110
90	11.2459	15.8765	56.0088	69.3495
120	47.1885	14.0022	80.3749	32.4146
150	9.1510	39.2503	70.0110	27.2326

PERIODO LLUVIOSO				
Gradiente (s^{-1})	5,5836	25,1487	33,2393	50,6189
Tiempo (min)	Turbiedad Remanente (%)			
5	58,616	43,019	82,138	41,509
10	48,427	52,956	92,579	85,157
20	29,308	52,453	50,943	64,402
30	22,893	77,107	69,434	114,089
40	166,038	135,849	50,818	131,949
50	31,824	120	127,044	115,22
60	23,145	42,516	144,654	66,541
90	17,987	111,446	145,912	105,409
120	17,736	135,849	72,956	51,321
150	21,384	158,491	52,956	41,761