

**ESTUDIO DEL BICARBONATO DE SODIO COMO ALCALINIZANTE PARA EL
TRATAMIENTO DE LAS AGUAS QUE ABASTECERÁN LA PLANTA GUADALUPE
DE EMPOPASTO S.A. E.S.P.**

DALILA SANTACRUZ BASTIDAS

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PASTO-COLOMBIA
2016

ESTUDIO DEL BICARBONATO DE SODIO COMO ALCALINIZANTE PARA EL
TRATAMIENTO DE LAS AGUAS QUE ABASTECERÁN LA PLANTA GUADALUPE DE
EMPOPASTO S.A. E.S.P.

Trabajo de grado escrito modalidad pasantía
para optar el título de Química

DALILA SANTACRUZ BASTIDAS

Director

GUSTAVO ORTIZ DULCE
Ingeniero Químico

Codirector

ANGÉLICA ORDOÑEZ GIRALDO
Química

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PASTO-COLOMBIA
2016

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

GUSTAVO ORTIZ DULCE
Director

LUIS ALEJANDRO GALEANO
Jurado

JUAN JOSÉ LOZADA CASTRO
Jurado

San Juan de Pasto, 11 de marzo de 2016.

RESUMEN

Se evaluó el efecto del bicarbonato de sodio como agente alcalinizante en el proceso de coagulación/floculación con hidroxiclorigenato de aluminio ACH para la eliminación de color y turbiedad de las mezclas de agua provenientes del embalse Río Bobo y de la quebrada Las Piedras. Esta última será la principal fuente de abastecimiento de la planta Guadalupe de EMPOPASTO S.A E.S.P. de filtración directa, y presenta dificultades en su tratamiento debido a que en la mayoría del tiempo tiene baja turbiedad, baja alcalinidad y alto color, condiciones particulares que hacen que el coagulante no remueva eficientemente materia orgánica natural MON responsable del color del agua. Los resultados muestran que al agregar alcalinidad adicional, se incrementa la eficiencia del proceso de coagulación/floculación. La dosis de bicarbonato a una concentración de 15 ppm presentó mayor porcentaje de remoción de color aparente y turbiedad, con valores en promedio de 92,6 y 74,0 respectivamente para las cuatro composiciones de mezclas de agua, comparado con los ensayos de pruebas de jarras que no se alcalinizaron con porcentajes en promedio de remoción de 77,3 para color aparente y 67,7 para turbiedad. Además, los resultados indican que los valores de alcalinidad y de conductividad del agua cruda aumentaron progresivamente a medida que se agregaron mayores cantidades de bicarbonato de sodio y también que el pH fue regulado con la adición del álcali ayudando a maximizar la eliminación de la MON soluble.

ABSTRACT

The effect of sodium bicarbonate was tested as an alkaline-making agent in the process of coagulation/flocculation with aluminum hydroxide chloride ACH in order to remove color and turbidity from the mixtures of water coming from Rio Bobo reservoir and Las Piedras stream. The latter will be the main source of water supply for the direct filtration plant Guadalupe of EMPOPASTO S.A E.S.P as this presents difficulties in its treatment due to the fact that most of the time it has low turbidity, low alkalinity, and intense color, particular conditions that cause the coagulant not to remove the natural organic material NOM effectively, which is responsible for water color. The results show that by adding extra alkalinity, the effectiveness of the coagulation/flocculation process is maximized. The bicarbonate dose at a concentration of 15ppm exhibited a higher percentage of color and turbidity removal, with average values of 92,6 and 74,0 respectively for the four water mixture compositions, compared to the jars tests that were not made alkaline with average removal percentages of 77,3 for apparent color, and 67,7 for turbidity. Moreover, the results indicate that alkalinity and water conductivity values increased progressively as higher sodium bicarbonate amounts were added, and also pH was regulated with the addition of alkali, thus helping to maximize the removal of soluble NOM.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN...	18
1 MARCO TEORICO	20
1.1 Partículas coloidales	22
1.1.1 Estabilidad e inestabilidad de los coloides	23
1.2 Uso del policloruro de aluminio PACl como coagulante en la producción de agua para consumo humano	27
1.3 Interacción de los coagulantes inorgánicos con el agua y la alcalinidad	30
1.4 Acondicionamiento de la alcalinidad y el pH	34
1.5 Naturaleza de la Turbiedad y el Color	35
1.5.1 Turbiedad	35
1.5.2 Color	36
1.6 Plantas de tratamiento de agua	39
1.6.1 Planta de tratamiento de agua de filtración directa (FD) ascendente - descendente ...	40
1.6.2 Descripción general de la planta Guadalupe	41
1.7 Diseño de experimentos y análisis estadístico	44
1.7.1 Diseño de bloques completos aleatorizados	47
2 MARCO REFERENCIAL.....	48
2.1 Mecanismos principales para la hidrólisis-polimerización	52
3 MARCO LEGAL.....	55
3.1 Legislación Colombiana para la calidad del agua para consumo humano	55
3.1.1 Características físicas del agua.	55
3.2 Conductividad.	55
3.3 pH.....	56
3.4 Características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.	56
4 OBJETIVOS	58
4.1 Objetivo general.....	58
4.2 Objetivos específicos.....	58
5 METODOLOGÍA	59
5.1 Toma de muestra de agua cruda para los ensayos de prueba de jarras	59
5.2 Diseño experimental.....	59

5.3	Elección del tamaño de la muestra	63
5.4	Caracterización del agua cruda y determinación de la dosis del coagulante	63
5.5	Ensayos de laboratorio usando prueba de jarras	63
5.6	Evaluación de los parámetros de respuesta en el agua tratada	65
5.6.1	Determinación de Color Aparente (CA)	65
5.6.2	Determinación de la turbiedad	65
5.6.3	Determinación del pH	66
5.6.4	Determinación de la alcalinidad total	66
5.6.5	Determinación de la conductividad	67
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
6.1	Elección del tamaño de la muestra	71
6.2	Efecto regulador de pH usando NaHCO_3	72
6.3	Influencia del pH sobre la eficiencia de remoción de color	77
6.4	Interacción de las especies de Al con ácidos húmicos	79
6.5	Mecanismos de eliminación de la MON	81
6.6	Influencia de la alcalinidad sobre el proceso de coagulación	85
6.7	Remoción de turbiedad con ACH	91
6.8	Efecto de la conductividad	94
7	CONCLUSIONES	97
8	BIBLIOGRAFÍA	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Anulación de cargas eléctricas de la superficie del coloide con la adición del coagulante.	21
Figura 2. Distribución de tamaños de las partículas en el agua.	23
Figura 3. Configuración esquemática de la doble capa eléctrica	24
Figura 4. Modelo de la doble capa difusa de Stern-Gouy	24
Figura 5. a) Esquematización de polímeros adsorbidos en la superficie de coloides. b) Interacción repulsiva debido a polímeros adsorbidos en la superficie de coloides	27
Figura 6. Observación In-situ de la morfología de los agregados Al_{13}	29
por microscopia de fuerza atómica (AFM)..	29
Figura 8. Esquema general de doble filtración	44
Figura 9. Estructura del polihidroxcation Keggin (Al_{13}).	54
Figura 10. Resumen de la hipótesis por medio de la prueba de FRIEDMAN.....	69
Figura 11. Medias de la dosis de alcalinizante sobre el pH final para cada una de las composiciones.....	74
Figura 12. Medias de la dosis de alcalinizante sobre el porcentaje de remoción de color de cada una de las composiciones.....	79
Figura 13. Interacción entre especies poliméricas de Al con los ácidos húmicos.	81
Figura 14. Modos de puente entre los iones de MON y de aluminio	83
Figura 15. Modelo de la interacción de las especies hidrolizadas del coagulante y materias orgánicas.	84
Figura 16. Medias de la dosis de alcalinizante sobre la alcalinidad final para cada una de las composiciones.....	86
Figura 17. Consumo de alcalinidad que presentó cada jarra en las cuatro composiciones.	90
Figura 18. Medias de la dosis de alcalinizante sobre el porcentaje de remoción de turbiedad de cada una de las composiciones de mezclas de agua.....	93
Figura 19. Medias de la dosis de alcalinizante sobre la conductividad para cada una de las composiciones.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Efecto del pH en las proporciones de especies iónicas de dióxido de carbono en agua. .	31
Tabla 2. Límites de calidad del agua aceptables para el tratamiento mediante FD ascendente– descendente .	41
Tabla 3. Tipos de diseño experimental	46
Tabla 4. Características físicas del agua para el consumo humano	55
Tabla 5. Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones indirectas sobre la salud humana	56
Tabla 6. Composiciones de las mezclas de agua analizadas en el laboratorio.	59
Tabla 7. Matriz experimental correspondiente a la composición 1 de los seis muestreos realizados.	60
Tabla 8. Matriz experimental correspondiente a la composición 2 de los seis muestreos realizados.	61
Tabla 9. Matriz experimental correspondiente a la composición 3 de los seis muestreos realizados.	61
Tabla 10. Matriz experimental correspondiente a la composición 4 de los seis muestreos realizados.	62
Tabla 11. Parámetros de mezcla rápida y de mezcla lenta utilizados en el laboratorio.	63
Tabla 12. Dosis de alcalinizante agregada en los ensayos de laboratorio usando prueba de jarras.	64
Tabla 13. Especificaciones químicas de los reactivos usados en el laboratorio.	65
Tabla 14. Análisis de varianza de los factores: “dosis de alcalinizante” y “material experimental” para cada una de las respuestas medidas en el laboratorio.	68
Tabla 15. Análisis de varianza de la covariable dosis de coagulante para cada una de las respuestas medidas en el laboratorio.	70
Tabla 16. Correlaciones entre el factor dosis de alcalinizante y la covariable dosis de coagulante.	70
Tabla 17. pH del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.	72
Tabla 18. Pruebas de múltiples rangos para el pH final de la dosis de alcalinizante de 15 ppm de cada una de las composiciones.	74
Tabla 19. Color aparente del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.	77
Tabla 20. Pruebas de múltiples rangos para el mayor porcentaje de remoción de color aparente por dosis de alcalinizante de cada una de las composiciones.	78
Tabla 21. Pruebas de múltiples rangos para la alcalinidad de la dosis de alcalinizante de 15 ppm de cada una de las composiciones.	85
Tabla 22. Alcalinidad del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.	87

Tabla 23. Prueba de múltiples rangos para la alcalinidad (sin agregar el ACH) por dosis de alcalinizante de todas las composiciones.	87
Tabla 24. Prueba de múltiples rangos para la alcalinidad final por dosis de alcalinizante de todas las composiciones.	88
Tabla 25. Turbiedad del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.	92
Tabla 26. Pruebas de múltiples rangos para el mayor porcentaje de remoción turbiedad por dosis de alcalinizante de cada una de las composiciones.	92
Tabla 27. Conductividad del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.	94
Tabla 28. Pruebas de múltiple rangos para la conductividad de la dosis de alcalinizante de 15 ppm de cada una de las composiciones.	95

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Procedimiento para la recolección de muestras	110
ANEXO 2: Registro fotográfico de los muestreos	111
ANEXO 3: Cálculos de la potencia de la muestra	112
ANEXO 4: Gráficos de las curvas de operación característica	116
ANEXO 5: Registro de datos obtenidos por los muestreos	117

GLOSARIO

Alcalinidad: La alcalinidad de una muestra de agua es su capacidad para reaccionar o neutralizar iones hidronio (H^+), puede considerarse también como la presencia en el agua de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos.

Coagulante: Los coagulantes son sustancias químicas que actúan anulando las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando floculos.

Color: El color en las aguas superficiales y subterráneas se debe principalmente a la presencia de materia orgánica natural, en particular materia húmica soluble.

Conductividad: La conductividad (o conductancia específica) de una solución de electrolito es una medida de su capacidad para conducir la electricidad. La unidad SI de conductividad es el Siemens sobre metro (S/m).

Partículas coloidales: Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1.000 nanómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Estas partículas presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad.

pH: Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O]^+$ presentes en determinadas disoluciones.

Proceso de coagulación (mezcla rápida): Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se produce al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

Proceso de floculación (mezcla lenta): Es reunir las partículas desestabilizadas por el coagulante para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.

Turbiedad: La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que hace que los rayos luminosos se dispersen o se absorban, en lugar de que se transmitan sin alteración a través de una muestra.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ACH: Hidroxicloruro de aluminio

Al_a: Especies de aluminio monoméricas

Al_p: Especies de aluminio poliméricas

Al_c: Especies de aluminiocoloidales

B: Basicidad

CA: Color aparente

CCA: Analizador electrocinético de carga

COD: Carbono orgánico disuelto

COT: Carbono orgánico total

MON: Materia orgánica natural

PACl: Policloruro de aluminio

SPDs: Subproductos de desinfección

UNT: Unidades nefelométricas de turbiedad

UPC: Unidades de platino y cobalto

USC: Unidades Streaming current

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas que se enfrenta en la eliminación de la MON soluble en aguas de baja turbiedad, es la incapacidad de producir un floculo aceptable, debido a la deficiencia de sitios de nucleación para su desarrollo, por tanto, en el proceso de potabilización de la Planta Guadalupe de EMPOPASTO S.A. E.S.P., se adicionarán sustancias químicas con el fin de mejorar y complementar los procesos físicos que se llevarán a cabo, buscando cumplir la normatividad vigente, que ha hecho más estrictas las medidas para la protección y el control de calidad del agua para consumo humano (Decreto 1575 de 2007 Ministerio de la Protección Social y su normatividad conexas).

Un sistema que presente una baja concentración coloidal y una baja alcalinidad, hace que la coagulación por captura sea más difícil; por tal motivo el pH disminuye al agregar el coagulante y no permite la formación de flocs. Así mismo, la coagulación por medio de adsorción también se hace difícil, ya que la concentración coloidal es demasiado baja para permitir el contacto intermolecular. Teniendo en cuenta lo anterior, es evidente que el agua debe contener alcalinidad apropiada para que se lleve a cabo el proceso de coagulación y por tanto una eliminación efectiva de la MON. Para realizar una coagulación efectiva, deberá agregarse alcalinidad adicional que promueva la hidrólisis del ACH a un rango de pH de coagulación óptimo.

El objetivo de este estudio fue evaluar el uso del bicarbonato de sodio como agente alcalinizante mediante experimentos de prueba de jarras, para ello se usaron mezclas de agua provenientes del embalse Río Bobo y quebrada Las Piedras, que serán las fuentes de abastecimiento de la planta Guadalupe de EMPOPASTO S.A. E.S.P. El desarrollo de la investigación y el alcance de los objetivos determinaron las condiciones adecuadas del tratamiento químico que permitió una remoción eficiente

de color aparente y turbiedad, convirtiéndose en un antecedente fundamental para el tratamiento de este tipo de aguas.

1 MARCO TEORICO

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas se destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación (o flotación) y filtración (Amirtharajah, 1981).

La Coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. Este proceso es el resultado de dos fenómenos:

-El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.

-El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua. Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etcétera. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada *mezcla rápida* (Cohen & Hannan, 1971).

En la figura 1 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. La adición de un coagulante neutraliza las cargas produciendo un colapso de la “nube de iones” que rodean los coloides de modo que puedan aglomerarse.

La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina al menor costo una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas, en comparación con otros métodos.

El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas. Por lo tanto se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de sedimentación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada.

De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas *flóculos*; estas pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida.

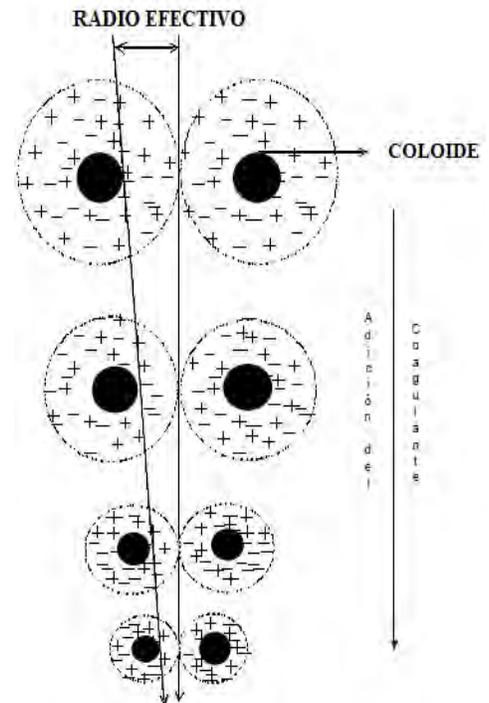


Figura 1. Anulación de cargas eléctricas de la superficie del coloide con la adición del coagulante.

La coagulación está fundamentalmente en función de las características del agua y de las partículas presentes, las mismas que definen el valor de los parámetros conocidos como pH, alcalinidad, color aparente y verdadero, turbiedad, temperatura, movilidad electroforética, fuerza iónica, sólidos totales disueltos, tamaño y distribución de tamaños de las partículas en estado coloidal y en suspensión, etcétera.

Para tener una idea de la importancia de la calidad del agua cruda, es necesario comentar, por ejemplo, que un agua que presenta color (de origen coloidal) y turbiedad relativamente baja a temperatura superior a 15 °C, sin tomar en cuenta los demás parámetros de calidad, puede ser candidata potencial al uso de filtración directa y se obviará, en la mayoría de los casos, la necesidad de floculación y sedimentación.

1.1 Partículas coloidales

Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1.000 nanómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Estas partículas presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad. En términos generales, los denominados coloides presentan un tamaño intermedio entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión. La figura 1 ilustra sobre el tamaño aproximado de las partículas y su distribución. Es necesario hacer notar, sin embargo, que en el caso de los coloides, sus dimensiones las define la naturaleza de los mismos.

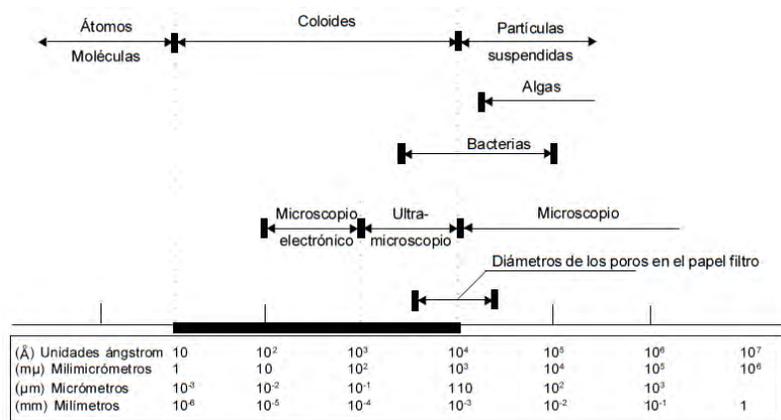


Figura 2. Distribución de tamaños de las partículas en el agua. (Arboleda J. 1992)

1.1.1 Estabilidad e inestabilidad de los coloides

Las suspensiones coloidales están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas. Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:

a) Carga eléctrica de los coloides (fuerza de estabilización)

En el agua, la mayor parte de las partículas y moléculas de sustancias húmicas poseen superficie cargada eléctricamente, usualmente negativa, que depende de los *grupos presentes en la superficie sólida*, los cuales pueden recibir o donar protones al reaccionar con el agua. La carga superficial de la partícula sólida depende de la concentración de protones (H^+) y, por tanto, del pH del agua. Con el aumento del pH disminuye la concentración de protones, el equilibrio de las reacciones se desplaza hacia la derecha y la superficie sólida se torna más negativa. Estos *grupos superficiales* pueden reaccionar en el agua con otros solutos además de protones.

Por otro lado, las cargas pueden ser el resultado de imperfecciones de la estructura molecular, como en el caso de las arcillas que se encuentran en suspensión en aguas turbias. Como ejemplo de este tipo de imperfecciones se puede mencionar la estructura reticular en tetraedro del SiO_4 . El átomo de Si^{+4} puede ser reemplazado por uno de Al^{+3} y la estructura reticular resultará con carga negativa.

b) La doble capa eléctrica

El sistema coloidal no presenta carga eléctrica neta debido a que la carga de superficie negativa es balanceada con los iones de carga contraria presentes en el agua. La figura 3 muestra una representación esquemática de una partícula coloidal negativa con una nube de iones alrededor de la misma. Como la superficie

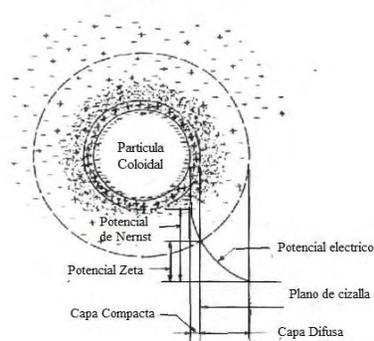


Figura 3. Configuración esquemática de la doble capa eléctrica (Vargas, L., 2004).

de la partícula es negativa, hay un cúmulo de iones positivos en la región de interfaz (sólido-liquido) que forman, junto con la carga negativa de la partícula, la doble

capa eléctrica, también denominada *capa compacta*. Los iones negativos se aproximan a la capa compacta y atraen iones positivos; así se forma la *capa difusa*, que engloba a la primera. En realidad, la capa difusa resulta de la atracción de iones positivos, de la repulsión electrostática de iones negativos (con la misma carga de la partícula) y la difusión térmica.

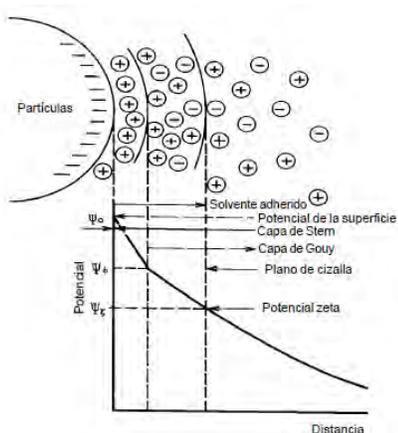


Figura 4. Modelo de la doble capa difusa de Stern-Gouy (Vargas, L., 2004).

Se tiene, por tanto, una concentración elevada de iones positivos próximos a la superficie del coloide, también denominada *capa de Stern*,

a partir de la cual se forma la capa difusa, en la cual la concentración de iones es menor. Se han

propuesto varios modelos para explicar la doble capa eléctrica. Quizás el modelo que explica mejor este fenómeno es el de doble capa difusa de Stern- Gouy (figura 4).

En este modelo hay tres potenciales de interés:

-El potencial Ψ_0 en la superficie coloidal. Es un potencial eléctrico creado por la presencia del coloide en el agua, que disminuye con la distancia, a partir de la superficie del mismo, donde es máximo. Se le denomina *potencial de Nernst*.

-El potencial Ψ_Φ (Phi), en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.

-El potencial Ψ_ζ (Zeta) en el plano de cizalla.

Según Stern, existe una distancia mínima entre la superficie del coloide y los iones de carga contraria (positivos), en la cual el potencial eléctrico decrece linealmente; en seguida la disminución resulta exponencial y pasa por la frontera entre la capa compacta y la difusa, lugar en que el potencial eléctrico, según Lykema, es designado *potencial zeta*. El concepto de ese potencial está asociado a la aplicación de la diferencia de potencial en una muestra de agua que contiene coloides negativos, de tal forma que una cierta porción del medio, en torno de la partícula, camine junto con esta al electrodo positivo, lo que caracteriza al *plano de la cizalla*.

De estos potenciales, el único que puede ser calculado por medio de electroforesis es el potencial zeta. El valor experimental de la velocidad de migración de las partículas coloidales en un campo eléctrico puede ser convertido a potencial zeta con las ecuaciones de Helmholtz -Smoluchowski, Henry o Debye - Huckel, de acuerdo con el tamaño de la partícula y la concentración de electrolitos. Debido a la incertidumbre sobre los valores asignados a las constantes en las ecuaciones, el cálculo del

potencial zeta puede diferir del valor real. Por esta razón, algunos prefieren referirse a *movilidades electroforéticas* en lugar de *potencial zeta*.

Estabilización estérica

La estabilización estérica puede resultar de la adsorción de polímeros en la superficie de las partículas coloidales, como se ilustra en la figura 5a. Los polímeros adsorbidos pueden estabilizar como desestabilizar, lo cual depende principalmente de la cantidad relativa del polímero y de las partículas, de la afinidad entre el polímero con la partícula en el agua y de la concentración y tipo de electrolitos presentes. La cuantificación de las fuerzas de interacción entre dos partículas en esas condiciones es extremadamente difícil. Por ende, son útiles algunas consideraciones al respecto, para comprender este fenómeno. Cuando hay interacción entre las superficies de dos partículas recubiertas por polímeros que se encuentran próximos, la repulsión entre ellas puede ocurrir de dos formas, tal como se muestra en la figura 5b. En una de ellas, con la colisión entre las partículas, cada capa de polímero puede ser comprimida, lo que reduce el volumen disponible para las moléculas adsorbidas y restringe el movimiento de los polímeros y causa, asimismo, la repulsión entre las partículas. En casos más frecuentes las capas adsorbidas se intercalan, lo que aumenta la concentración de los segmentos de los polímeros en esa región; si los segmentos extendidos de los polímeros fueran fuertemente hidrofílicos, ocurre preferentemente la reacción entre ellos en el agua, y tienden a repelerse. En las aguas naturales las sustancias húmicas, que son polímeros aniónicos, pueden ser adsorbidos en la interfaz sólido-líquido y contribuir a la estabilidad por efectos estéricos.

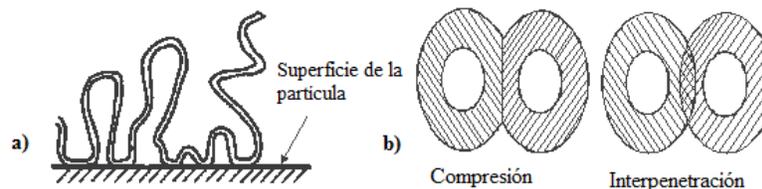


Figura 5. a) Esquematación de polímeros adsorbidos en la superficie de coloides. b) Interacción repulsiva debido a polímeros adsorbidos en la superficie de coloides (Vargas, L.,2004).

1.2 Uso del policloruro de aluminio PACl como coagulante en la producción de agua para consumo humano

El PACl, es un coagulante líquido usado para eliminar MON en el tratamiento de aguas naturales y residuales. Su nombre policloruro hace referencia a su verdadera composición química, ya que en realidad no se trata de un compuesto de fórmula definida sino más bien de una mezcla de polímeros o polímeros agregados de hidroxiclorigen de aluminio con fórmula $Al_n(1OH)_mCl_{(3n-m)}$ con $0 < m < 3n$.

El PACl contiene concentraciones variables de clorigen de aluminio y esta concentración es expresada por convención como porcentaje en peso de Al. El rango de esa concentración va de 2,5% a 13 %. El PACl puede prepararse a partir de varias sustancias que contengan aluminio, incluido el aluminio metálico, la alúmina trihidratada, el clorigen de aluminio, el sulfato de aluminio y combinaciones de estos. Dependiendo del proceso de manufactura, el producto final puede contener varias sales de sodio, calcio y magnesio, tanto de clorigenos como de sulfatos. Desde el punto de vista de su uso como coagulante, puede decirse que presenta buenas características, ya que tiene una alta carga eléctrica previa a su agregado al agua que se va a tratar. Así mismo, tiene una moderada masa molecular, lo que también es una propiedad deseable (AWWA, Standard Methods Standard for liquid polyaluminium chloride (1997)).

La naturaleza del PACI está altamente relacionada con su basicidad, que afecta en gran medida el comportamiento del proceso de coagulación. La basicidad (B) se refiere al número de iones hidróxido promedio por átomos de aluminio en las moléculas del PACI (OH/Al), y es un índice del grado de polimerización (SINHA *et al.*, 2004). Algunos investigadores han sugerido que la basicidad ajustado en el intervalo de 2 a 2,3 durante la preparación de PACI puede producir alto contenido del polimerización Al_{13} (es decir, $[AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$) (Bottero, 1980; Van Benschoten & Edzwald, 1990; Y.H & Dempsey, 1998)

Estudios han indicado que las principales especies pre-hidrolizadas de PACI corresponden al polimerización Al_{13} que posteriormente puede desestabilizar la MON por una fuerte neutralización de la carga para eliminarla eficazmente del agua a través del proceso de coagulación (LIU, Hu, ZHAO, & QU, 2009). Sin embargo, otros estudios han informado que el Al_{13} hidrolizado in situ muestra un mejor rendimiento en la eliminación de la MON por coagulación/sedimentación (HU, LIU, & QU, 2006) (Zhao, LIU, & Hu, 2009).

El PACI ha sido estudiado por muchos investigadores por ser superior a los coagulantes de Al tradicionales (por ejemplo, $AlCl_3$ y alumbre) utilizados en la eliminación de partículas y/o de materia orgánica bajo ciertas condiciones. Se ha reconocido que el rendimiento de los coagulantes poliméricos de aluminio depende en gran medida de las características de la especiación del Al ((Tzoupanos, Zouboulis, & Tsoleridis, 2009; (Pernitsky & Edzwald, 2006). Durante la hidrólisis se ha propuesto la formación de muchas especies, pero sólo las especies de Al_{13} han sido bien estudiadas. Las funciones y la importancia relativa de otras especies de Al y los mecanismos implicados en el proceso de coagulación no están claros.

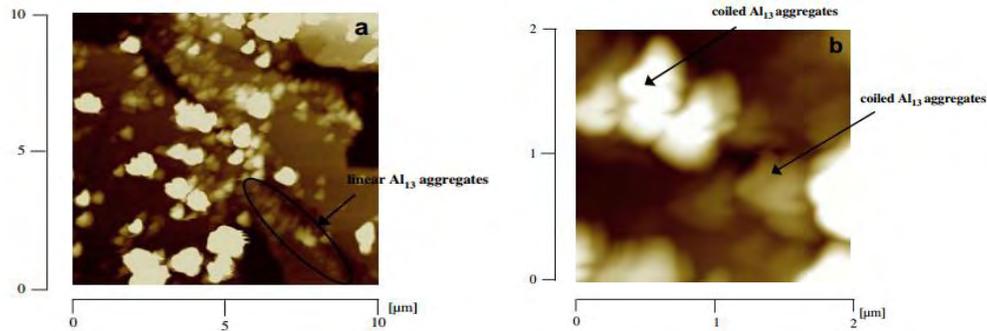


Figura 6. Observación In-situ de la morfología de los agregados Al₁₃ por microscopía de fuerza atómica (AFM). (Jr-Lin Lina et al., 2008).

El PACl, en contacto con el agua a tratar, experimenta reacciones de hidrólisis variables. En general, la introducción de un ion metálico en el agua provoca la formación de una serie de especies, más o menos complejas, con características propias, y cuyo control es uno de los pasos decisivos en el desarrollo del proceso de coagulación.

La reacción de hidrólisis de un PACl se da por etapas. Dependiendo de las condiciones del proceso, se forman los siguientes productos intermedios: dímeros $[Al_2(OH)_2(H_2O)_8]^{+4}$; complejos polihidroxilos $[Al_8(OH)_{20}]$, $[Al_8(OH)_{22}]^{+2}$, $[Al_8(OH)_{24}]$, $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{+7}$, $[Al_{14}(OH)_{38}]^{+8}$, $[Al_{30}Cl_9(OH)_{81}(H_2O)_{38}]^{+5}$; compuestos complejos $[Al_8(OH)_{20}(H_2O)_{10}]Cl_4$ y partículas y agregados en la forma original del PACl (Bochkarev, Kurbatov, & Kondrat, 2003). La eficiencia de la coagulación está en función de cuál o cuáles de los anteriores productos intermedios de la hidrólisis reaccionan con las impurezas del agua.

1.3 Interacción de los coagulantes inorgánicos con el agua y la alcalinidad

La alcalinidad es uno de los parámetros más importantes en el tratamiento del agua, pues influye directamente en la coagulación. La alcalinidad de una muestra de agua es su capacidad para reaccionar o neutralizar iones hidronio (H^+), también puede considerarse como la presencia en el agua de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos y en menor grado por los boratos, fosfatos y silicatos, que puedan estar presentes en la muestra (Approved by Estándar Methods Committee, 2011). En un sentido estricto las principales especies causantes de alcalinidad y su asociación con la fuente, son las siguientes:

- Hidróxidos, OH^- : Aguas naturales, residuales e industriales
- Bicarbonatos, HCO_3^- : Aguas naturales y residuales
- Carbonatos, CO_3^{2-} : Aguas naturales y residuales

Pese a lo anterior, en la mayoría de cuerpos de aguas naturales la alcalinidad se halla asociada al sistema carbonato, es decir, a los carbonatos y bicarbonatos presentes. En forma natural, el agua puede adquirir alcalinidad al disociarse el dióxido de carbono (CO_2) en ella, el cual produce ion bicarbonato e ion carbonato. La mayor importancia que tiene la alcalinidad es que bajo estas condiciones reacciona con coagulantes hidrolizables como el PACl que no permite un descenso brusco de pH. La proporción entre los componentes del sistema carbonato, CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} , determinan el valor de pH.

Es evidente que las proporciones de las especies iónicas de dióxido de carbono son alteradas significativamente por cambios en pH. A un $pH < 6$, CO_2 es la especie dominante. A valores de pH entre 7 y 9, HCO_3^- predomina, mientras que CO_3^{2-} comienza a aumentar su concentración

significativamente a valores de pH > 9. La alcalinidad es uno de los parámetros más importantes en el tratamiento del agua, pues influye directamente en la coagulación o el ablandamiento. La concentración relativa de cada componente está en función del pH, como muestra la figura 7.

Figura 7. Efecto del pH en la composición de una solución con alcalinidad total de 200 mg/L como CaCO₃ (Vargas, L., 2004).

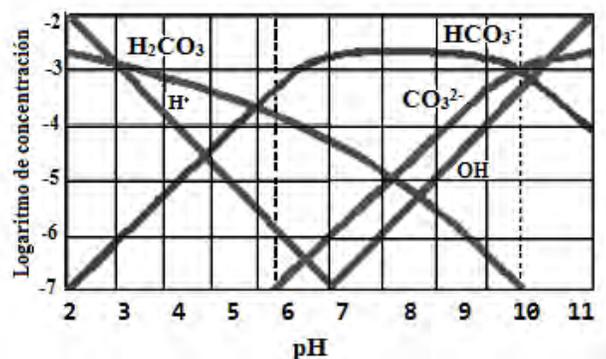
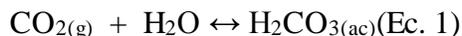


Tabla 1: Efecto del pH en las proporciones de especies iónicas de dióxido de carbono en agua (Hutchinson, 1957)

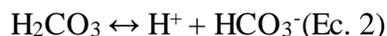
pH	CO ₂	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻
4	0,996	0,004	1,25 x 10 ⁻⁹
5	0,962	0,038	1,20 x 10 ⁻⁷
6	0,725	0,275	9,1 x 10 ⁻⁵
7	0,208	0,792	2,6 x 10 ⁻⁴
8	0,025	0,972	3,2 x 10 ⁻³
9	0,003	0,966	0,031
10	0,000	0,757	0,243

La química de los procesos ácido-base de un agua natural está dominada por la presencia del ion carbonato, CO₃²⁻, que es una base moderadamente fuerte, así como del ácido débil H₂CO₃, y de sus interrelaciones. Aunque en un agua la mayor parte del CO₂ disuelto está como CO₂ rodeado de moléculas de agua, parte estará en la forma de ácido carbónico, de tal forma que cuando se habla en

general de ácido carbónico se asume también la parte del gas disuelta ($\text{CO}_{2(\text{ac})}$), a pesar de que es esta última la forma mayoritaria en la que se encuentra. Así, la primera reacción de equilibrio que tiene lugar cuando el CO_2 pasa a la fase acuosa:



Una vez formado, el ácido carbónico se disocia parcialmente para dar bicarbonato y protones:



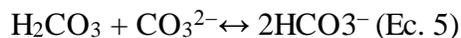
Aunque desde un punto de vista más formal se debería decir que el CO_2 disuelto, que es un ácido de Lewis, hidroliza al agua dando protones al medio, según el proceso



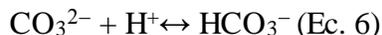
La fuente mayoritaria de bicarbonato en un agua natural no es este proceso, sino el proveniente del lavado de rocas calizas que hace que parte del carbonato que contienen pase al agua, aumentando de forma natural el pH de estas aguas, ya que hidroliza parcialmente al agua dando OH^- , lo que lo convierte en una base moderadamente fuerte.



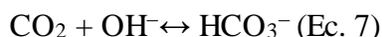
Pero existen más procesos químicos que interrelacionan estas especies, todos ellos conducentes a la formación de bicarbonato. Por ejemplo, la reacción directa entre el ácido carbónico (ácido) y el ion carbonato (base), según el proceso:



Que a tenor de la 'realidad' química de las especies implicadas sería un proceso mejor visto como la reacción entre el carbonato y uno de los protones derivados de la hidrólisis del CO_2 :



Y el CO_2 , por su parte, puede reaccionar con los OH^- derivados de la hidrólisis del carbonato:



El ion bicarbonato, que se encuentra como especie química entre el carbonato y el ácido carbónico en lo que se refiere a captación de protones, puede por tanto comportarse como ácido (dando protones al medio y pasando a carbonato) o como base (captando protones del medio y pasando a ácido carbónico). Una sustancia que puede actuar tanto como ácido como base se conoce como especie anfótera.

En general, un agua va a ser finalmente rica en bicarbonatos ya que todos los equilibrios conducen a su formación. Que un agua sea finalmente ligeramente básica, como es lo habitual en un agua natural, se debe básicamente a la existencia de más carbonatos en disolución que ácido carbónico, lo que hace que el grado de hidrólisis para dar OH^- sea superior. Así, tendríamos a las tres especies carbonadas ligadas a través de su disociación en agua, junto con los procesos de hidrólisis ligados tanto al carbonato como al ácido carbónico ((Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, 1992)

1.3.1 Acondicionamiento de la alcalinidad y el pH

El pH es un parámetro que mide la concentración de iones hidronio presentes en el agua y es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. El rango de pH óptimo está en función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar. (Letterman & Vanderbrook, 1983).

Por ejemplo, para sales de aluminio y para los coagulantes poliméricos, el rango de pH para la coagulación es de 6,5 a 8,0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5,5 a 8,5 unidades (Edeline, F.1990). Durante el tratamiento de agua, posiblemente se requieran el ajuste del pH, el cual es aumentado o disminuido a través de la adición de bases o ácidos. Para el acondicionamiento del pH se puede usar el hidróxido de sodio, cal, sosa calcinada, o bicarbonato de sodio. La elección del material depende de factores tales como: el costo, la dureza, o el contenido de bióxido de carbono del agua.

La corrección del pH es un método preventivo de la corrosión de tuberías. Consiste en la alcalinización del agua para remover el gas carbónico libre y formar una película de carbonato en la superficie interna de las tuberías y disminuyendo el exceso de acidez en el agua. La medición de pH es una de las pruebas más importantes y utilizadas con frecuencia en la química del agua. Prácticamente todas las fases de suministro de agua y tratamiento de aguas residuales como la neutralización ácido-base, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión, dependen del pH. Un ejemplo de ello es la necesidad de estabilizar el pH para que la actividad del desinfectante químico tenga su máxima efectividad, para una determinada dosis y un tiempo de contacto determinado (Hilleboe, 1984).

1.4 Naturaleza de la Turbiedad y el Color

1.4.1 Turbiedad

La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que hace que los rayos luminosos se dispersen o se absorban, en lugar de que se transmitan sin alteración a través de una muestra. No debe relacionarse la turbiedad con la concentración en peso de los sólidos en suspensión, pues el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas, son factores que también afectan la dispersión de luz.

La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de turbidez(UNT). El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua. El método nefelométrico se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas, con la intensidad de la luz dispersada por una solución patrón de referencia en idénticas condiciones. Cuanto mayor es la intensidad de la luz dispersada, más intensa es la turbiedad.

Las sustancias responsables de la turbiedad del agua son las partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimentos, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton, bacterias y otros microorganismos. Estas partículas causantes de la turbiedad pueden ser coloidales o materia insoluble de mayor tamaño. Los componentes más frecuentes y comunes de las aguas turbias son las arcillas, que constituyen un material natural, terroso, de gránulos muy finos, que se vuelve plástico cuando se mezcla con cierta cantidad de agua. Varios análisis de arcilla han demostrado que ésta se compone principalmente de sílice, aluminio y agua, frecuentemente con cantidades apreciables de hierro, álcalis y tierra alcalina.

1.4.2 Color

El color en las aguas superficiales y subterráneas se debe principalmente a la presencia de materia orgánica natural, en particular materia húmica acuática. La materia húmica consiste en ácidos húmicos y fúlvicos que causan un color amarillo-marrón. Los ácidos húmicos dan un color más intenso, y la presencia de hierro intensifica el color a través de la formación de humatos férricos solubles. Es importante anotar que la relación entre color y pH no es directa, puesto que a pH 8,0, una solución de 1 mg/L de ácido húmico tiene un color de 26,5, mientras que a este mismo pH, una solución de 1 mg/L de ácido fúlvico tiene un color de 2,8, casi 10 veces menor.

Las partículas en suspensión, en especial partículas coloidales de gran tamaño tales como arcillas, algas, hierro y óxidos de manganeso, dan una apariencia a aguas de color; que deben ser eliminadas antes de la medición. Las aguas residuales industriales pueden contener ligninas, taninos, colorantes, y otros productos químicos orgánicos e inorgánicos que causan color. Los materiales húmicos y el color causado por estos materiales se retiran de los suministros de agua potable por motivos de salud porque son precursores en la formación de subproductos de desinfección (SPDs). El color también se elimina para hacer el agua adecuada para aplicaciones industriales.(Edswald, 2001)

La expresión color debe considerar que define el concepto de “color verdadero”, esto es, el color del agua de la cual se ha eliminado la turbiedad. El término “color aparente” engloba no solo el color debido a sustancias disueltas sino también a las materias en suspensión y se determina en la muestra original sin filtrarla o centrifugarla. Esta contribución puede resultar importante en algunas aguas residuales industriales, casos en que ambos colores deben ser determinados. El color puede

determinarse por espectrofotometría o por comparación visual. Este último resulta más sencillo y consiste en la comparación de la muestra con soluciones coloreadas de concentraciones conocidas. El método estandarizado utiliza patrones de platino cobalto y la unidad de color (UC) es la producida por 1mg/L de platino en la forma de ion cloroplatinato.(APPA-AWWA-WEF, 2005).

El color existente en el agua no se deriva únicamente de la descomposición de productos naturales sino también de hidróxidos metálicos, como el del hierro, además de compuestos orgánicos desconocidos presentes en los desechos domésticos e industriales.

Un aspecto muy importante que se debe tomar en cuenta es que se ha demostrado que las sustancias responsables de la coloración natural del agua pueden reaccionar con el cloro para producir compuestos organoclorados, principalmente cloroformo, CHCl_3 y otros trihalometanos. El cloroformo es catalogado como un compuesto carcinógeno (en estudios con animales). Este tema es motivo de preocupación y de muchas investigaciones, dada su significación para la salud (Vargas, L.2004).

La importancia de la remoción del color en el agua está relacionada también con los aspectos de aceptabilidad del consumidor y/o usuario, sea este doméstico o industrial, lo que incluye los siguientes aspectos:

- a) Estética. Por lo general, el consumidor prefiere un agua clara y sin color.
- b) Sabor. El color puede impartir sabor al agua.
- c) Demanda de cloro. La presencia de color aumenta la cantidad de cloro necesaria.
- d) Nutrientes. Por su naturaleza, en algunos casos, el color puede actuar como nutriente de las bacterias y algas.

- e) Requerimientos industriales. Muchas industrias requieren un agua que no presente color o que tenga uno muy bajo.
- f) Resinas de intercambio. El color puede ensuciar y dañar las resinas de intercambio aniónico.
- g) Análisis. El color puede interferir en las mediciones colorimétricas de análisis.
- h) Productividad. El exceso de color puede reducir la productividad del agua.
- i) Quelación. El color puede aumentar la concentración de hierro soluble, manganeso y plomo en el agua y estabilizar su presencia por medio de la quelación.
- j) Salud. El color puede deberse a la presencia de desechos tóxicos.

1.4.2.1 Características de la Materia Orgánica Natural MON

Durante los últimos 25 años se ha evidenciado un incremento sustancial en el contenido de materia orgánica natural (MON) en las aguas superficiales (Korth, Fiebiger, & Bornmann, 2004), en algunos casos de muy difícil eliminación mediante técnicas fisicoquímicas convencionales. La MON ocasiona muchos problemas durante los procesos de producción de agua para consumo humano, que se pueden recoger en los siguientes aspectos generales: (1) Efecto negativo sobre la calidad del agua debido a que imparte color, olor y sabor al agua; (2) Incremento en el consumo de coagulantes y desinfectantes, lo que a su vez se ve reflejado en un mayor volumen de lodos y un mayor potencial de formación de subproductos de desinfección; (3) Promoción de la proliferación o recrecimiento de micro-organismos a lo largo de los sistemas de distribución; y (4) Mayores niveles de metales pesados y contaminantes orgánicos complejos (Galeano, 2014).

La compleja composición de la materia orgánica en los sistemas naturales, impide hacer una separación, identificación y cuantificación sencilla de las fracciones que la constituyen. La MON

comprende en general componentes hidrofóbicos e hidrofílicos, de los cuales las sustancias hidrofóbicas de carácter ácido representan la mayor fracción, alrededor del 50 % del Carbono Orgánico Total (COT) (Matilainen y Sillanpää, 2010). Estas sustancias se forman por la biodegradación de las plantas y el tejido animal en el suelo y ambientes acuáticos, y pueden fraccionarse en ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. La MON hidrofóbica es rica en carbono aromático, estructuras fenólicas y dobles enlaces conjugados, mientras que la fracción hidrofílica contiene carbono de carácter más alifático y compuestos nitrogenados como aminoácidos y carbohidratos. Las características químicas y físicas de las sustancias húmicas varían ampliamente, pero generalmente se pueden clasificar como grandes macromoléculas polielectrolíticas. La composición química de las sustancias húmicas oscila, en peso, de 40 a 60 por ciento de carbono, de 30 a 50 por ciento de oxígeno, de 3 a 6 por ciento de hidrógeno, y de 1 a 4 por ciento de nitrógeno (MacCarthy & Suffet, 1989); (Steinberg & Muenster, 1985)

El fraccionamiento físico-químico de la MON a un valor de pH dado se ha empleado para clasificar los solutos en alguna de estas dos fracciones. Aunque este tipo de fraccionamiento es más operativo que estructural, (Swietlika, Dabrowska, Raczyk Stanislawiak, & Nawrocki, 2004 y Buchanan, Roddick, Porter, & Drikas, 2005) han propuesto hace algún tiempo la asignación general de una serie de compuestos orgánicos en cada una de tales fracciones, según la longitud de su cadena y la naturaleza de sus grupos funcionales.

1.5 Plantas de tratamiento de agua

Una planta de tratamiento es una secuencia de operaciones o procesos unitarios, convenientemente seleccionados con el fin de remover totalmente los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda y parcialmente los físicos y químicos, hasta llevarlos a los límites aceptables

estipulados por las normas. Existen diferentes tipos de plantas de tratamiento de agua, que se pueden clasificar de acuerdo al tipo de procesos que las conforman, entre las cuales se encuentran: plantas de filtración rápida completa, plantas de filtración directa, plantas de filtración lenta, plantas convencionales antiguas, plantas convencionales de tecnología apropiada y plantas de tecnología importada o de patente (Amirtharajah, The mechanisms of coagulation, 1989).

1.5.1 Planta de tratamiento de agua de filtración directa (FD) ascendente - descendente

Es una alternativa a la filtración rápida, constituida por los procesos de coagulación (mezcla rápida), filtración y desinfección, apropiada solo para aguas claras. Son ideales para este tipo de solución las aguas provenientes de embalses o represas, que operan como grandes presedimentadores y proporcionan aguas constantemente claras y poco contaminadas. A continuación se indica los principales parámetros de los sistemas de filtración en función de las características del agua cruda. La tabla 2 sintetiza los rangos de calidad de agua óptimos para la FD ascendente-descendente.

Tabla 2. Límites de calidad del agua aceptables para el tratamiento mediante FD ascendente–descendente (Amirtharajah, The mechanisms of coagulation, 1989).

Alternativa	Parámetros	90 % del tiempo	95 % del tiempo	100 % del tiempo
Filtración directa	Turbiedad	≤ 50	≤ 100	≤ 150
Ascendente- descendente	NTU Color UPC	≤ 50	≤ 75	≤ 100

Normalmente para una planta de FD, se considera una floculación corta, generalmente de no más de 6 a 8 minutos, para obtener un efluente de calidad constante, aunque con carreras de filtración más cortas. Esta es la alternativa más restringida de todas en cuanto a la calidad de agua que se va a tratar, por lo que si se producen bruscos cambios en la calidad en la fuente, no hay tiempo suficiente para modificar la dosificación. En la figura 8 se indica un esquema de una instalación de doble filtración, constituido de un filtro ascendente y de un descendente, operado con tasa constante (Canepa de vargas, 2004).

1.5.2 Descripción general de la planta Guadalupe

Teniendo en cuenta la calidad del agua cruda de la quebrada Las Piedras y principalmente la baja turbiedad y la dificultad de formar floc para reducir el alto contenido de color, se ha optado por proyectar una planta de doble filtración en la cual los procesos de floculación y sedimentación se llevan

a cabo en filtros de flujo ascendente o “clarificadores de contacto” los cuales son similares a los filtros rápidos pero funcionando en sentido inverso. El agua clarificada pasa luego a filtros descendentes como se hace tradicionalmente. La secuencia del tratamiento es como sigue:

- El agua cruda derivada de la conducción existente entre el tanque Cruz de Amarillo y la planta de tratamiento “El Centenario”, recibe la dosificación de bicarbonato de sodio y posteriormente de hidroxicloriguro de aluminio líquido e ingresa a una cámara de flujo ascendente acondicionada como mezclador rápido hidráulico.
- De la cámara de mezcla rápida el agua coagulada pasa a un canal de distribución a todas las unidades de filtración de flujo ascendente mediante tuberías de ingreso individuales provista de válvulas de admisión situadas en cámara seca, lo cual en estos filtros se efectúan los procesos de floculación y sedimentación.
- El canal de distribución del agua coagulada actúa a su vez como canal de interconexión de los filtros de flujo ascendente en tal forma que permiten que operen en la modalidad de tasa variable declinante con caudales de ingreso variables según su grado de colmatación; que permite además el lavado de un filtro con el flujo que ingresa a la planta. El paso de la cámara de mezcla rápida al canal de distribución e interconexión se efectúa mediante un vertedero rectangular de descarga libre el cual permite medir el caudal de ingreso a la planta y variarlo mediante la operación de la válvula de ingreso.

- El agua clarificada procedente de los filtros de flujo ascendente es recolectada individualmente en canaletas las cuales descargan en un canal común a todas las unidades. De este canal se derivan las tuberías de ingreso a cada uno de los filtros de flujo descendente.
- En los filtros de flujo descendente se completa el proceso de tratamiento. Estos también funcionan en la modalidad de tasa variable declinante con distribución de caudales de ingreso según su grado de colmatación y lavado de los mismos mediante la utilización parcial o total del agua tratada producida por la batería de filtros. Para estas operaciones los filtros están interconectados mediante el canal de distribución del agua clarificada y mediante un canal de interconexión de todos los efluentes de los filtros de flujo descendente.
- A la salida del canal de interconexión de filtros el agua tratada recibe la aplicación de cloro en solución y pasa a un “tanque de contacto” a fin de permitir que la desinfección del agua se procese a pH bajo durante un tiempo adecuado (20 minutos).
- Finalmente el agua pasa a la cámara de salida del agua tratada mediante vertedero rectangular de descarga libre el cual permitirá medir el caudal de salida de la planta. Anexa a esta cámara se proyecta un tanque de compensación que permite programar las operaciones de lavado “mutuo” de filtros con el agua producida por la planta sin que la tubería de salida quede en seco.

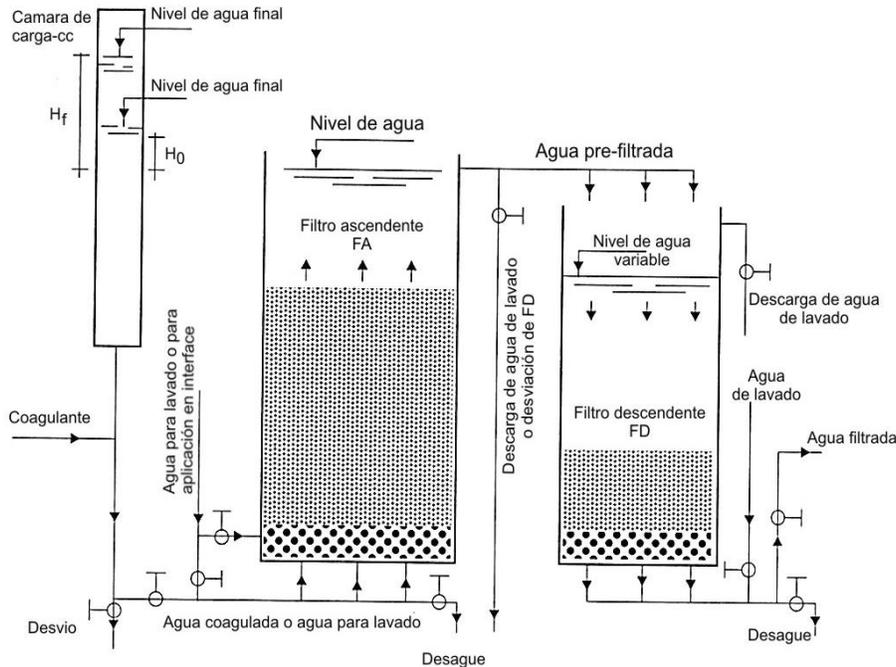


Figura 8. Esquema general de doble filtración

1.6 Diseño de experimentos y análisis estadístico

Se entiende por diseño experimental la planeación de una serie de experimentos donde se varían los valores de las variables de entrada de un proceso o sistema y se miden los valores de la variable respuesta o variable de salida, generalmente con el fin de optimizarla en algún sentido. También se llama diseño experimental al resultado de dicha planeación.

El diseño experimental es utilizado ampliamente para mejorar el rendimiento de los procesos industriales, así como para el desarrollo de nuevos productos, obteniendo de esta manera un ahorro en tiempo y costos de operación. Aporta además un conocimiento profundo de los procesos, generando herramientas eficaces en el manejo de los mismos. El diseño estadístico de experimentos es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados que puedan ser analizados mediante métodos

estadísticos, con objeto de producir conclusiones válidas y objetivas. Generalizando, podemos aplicar el diseño de experimentos para: (1) Determinar qué variables tienen mayor influencia en los valores de respuesta (2) determinar el mejor valor de tales variables, que permitan obtener un valor lo más cercano posible al de respuesta deseado (3) determinar el o los mejores valores de las variables independientes, con los cuales la variable de respuesta tenga menor variabilidad.

Existen varios aspectos que pueden influir en la selección de un diseño experimental, y el modificar alguno(s) conduce generalmente a cambiar el diseño. Estos aspectos son básicamente los siguientes:

- El objetivo del experimento: Es necesario comprender totalmente el problema que se desea estudiar y tener claro el objetivo principal y los objetivos específicos.
- El número de factores a controlar: Es necesario investigar previamente cuál o cuáles factores son los que conviene incluir en el experimento. Si son varios se puede partir de diseños fraccionarios para dilucidar cuál o cuáles son los más importantes.
- El número de niveles que se prueban en cada factor: La elección inapropiada de los niveles de las variables o factores se traduce en la obtención de respuestas fuera de los niveles esperados de los efectos que interesa investigar. Es importante conocer cuál o cuáles efectos son los más importantes, pues si solamente se incluye una parte de éstos se puede reducir notablemente el diseño, y con esto, el número de experimentos necesario.
- El costo del experimento, tiempo y precisión deseada: La consideración de estos aspectos en la selección y planeación del diseño pueden hacer la diferencia entre la selección de un diseño u otro.

- El objetivo del experimento: Se ha utilizado como un criterio general de clasificación de los diseños experimentales, mientras que los otros cuatro aspectos son útiles para sub-clasificarlos. En este sentido, los diseños se pueden clasificar de la siguiente manera.

Tabla 3. Tipos de diseño experimental

Diseños para comparar dos o más tratamientos	Diseño completamente al azar Diseños de bloques completos al azar Diseño encuadrados latinos y grecolatinos
Diseños para comparar el efecto de los factores sobre la(s) respuesta(s)	Diseños factoriales 2k Diseños factoriales 3k Diseños factoriales 2k-p fraccionados
Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso	Diseño para modelos de primer orden: Diseños factoriales 2k y 2k-p Diseño de Plakett — Burman Diseño Simple Diseños para modelos de segundo orden: Diseño central compuesto Diseño Box - Behnken Diseños factoriales 3k y 3k-p
Diseños de mezclas	Diseño de redes simple Diseño simple con centroides Diseño con restricciones

	Diseño Axial
Diseños robustos	Diseños ortogonales Diseños con arreglos interno y externo

Los resultados de las corridas del diseño de experimentos seleccionado se analizan estadísticamente para detectar las fuentes de variabilidad: el error o las variables de entrada o factores significativos que afectan en la variable de salida o de respuesta.

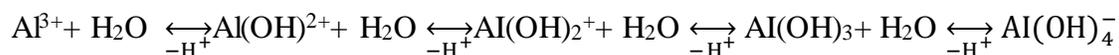
1.6.1 Diseño de bloques completos aleatorizados

En cualquier experimento, la variabilidad que surge de un factor perturbador puede afectar los resultados. En general, un factor perturbador puede definirse como un factor del diseño que probablemente tenga un efecto sobre la respuesta, pero en el que no existe un interés específico. En ocasiones un factor perturbador es desconocido y no controlable; es decir, se conoce la existencia de ese factor e incluso puede tener niveles variables mientras se esté realizando el experimento. La aleatorización es la técnica del diseño que se utiliza para protegerse contra estos efectos perturbadores “que están al acecho”. En otros casos, el factor perturbador es conocido pero no controlable. Cuando la fuente de variabilidad perturbadora es conocida y controlable, puede usarse una técnica de diseño llamada formación de bloques para eliminar de manera sistemática su efecto sobre las comparaciones estadísticas entre los tratamientos. La formación de bloques es una técnica de diseño muy importante que se utiliza ampliamente en la experimentación industrial.

2 MARCO REFERENCIAL

Hay gran cantidad de información en la literatura sobre la química acuosa de Al (III), sin embargo, existen algunos principios establecidos que se relacionan directamente con la hidrólisis del aluminio. Las diferentes especies de hidrólisis pueden formarse dependiendo de varios factores tales como: la concentración de aluminio, el pH, la temperatura, la relación básica (r), definida como la relación molar de los iones de hidróxido a iones de Al; la concentración de la base, el tipo de bases adoptadas, los métodos de alcalinización y aniones y partículas co-existentes. Los parámetros más importantes que gobiernan la naturaleza de las especies son: el valor (r), la temperatura de envejecimiento y el tiempo (Gray, Yao, & O'Melia, 1995).

Estudios realizados por (Exall & Van Loon, 2003) indican que bajo diferentes condiciones de pH se producen tres productos distintos de hidrólisis con PACl, estos productos de hidrólisis podrían mostrar diferentes efectos sobre el tamaño y la formación del floc, las diferencias se basan en la valencia eléctrica de la especie, que son fuertemente dependiente del pH como se indica a continuación:



Existen especies de Al que dominan en diferentes regiones de pH. Las especies monoméricas de Al dominan por debajo de pH 5,0; hidróxido de Al, es decir, $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{am})}$ dominan entre pH 6,5 y pH 8,0; y los iones aluminato, es decir, $\text{Al}(\text{OH})_4^{-}$, dominan por encima de pH 10,0. Cabe señalar que estas especies se forman según las condiciones dadas del agua cruda, debido a que la interacción de estas

diferentes especies de Al con la MON también tiene el potencia(Wang, Sun, Xu, Tang, & Gregory, 2004)l de afectar el comportamiento de la formación del foc.

Varios métodos químicos e instrumentales se han utilizado en el seguimiento del proceso de hidrólisis/polimerización y la caracterización de la distribución de la especie química. Sin embargo cada uno de estos métodos tiene sus fortalezas y deficiencias (Tang, 1990); Parker y Bertsch, 1992;(Wang & Tang, 2001). En los últimos años, el método de espectrofotometría de complejación Ferrón cromometrado se ha convertido en el método principal de caracterización (Hsu & Cao, 1991);(Wang, Sun, Xu, Tang, & Gregory, 2004). El método Ferrón se introdujo en 1971 como un medio para distinguir entre las formas de aluminio solubles en un sistema acuoso, y se ha encontrado una amplia aplicación en el tratamiento de aguas(Smith, 1971),(Gray, The preparation, characterization and use of inorganic iron (III) polymers for coagulation in water treatment, doctoral dissertation, 1988).Con el ensayo Ferrón, a través de las diferentes velocidades de reacción, se ha encontrado que las especies químicas hidrolizadas de Al (III) se pueden dividir en tres tipos: especies monoméricas (Al_a), especies poliméricas medianas (Al_b), y especies coloidales o especies sólidas (Al_c)(Duan & Gregory, 2003); (Wang, Sun, Xu, Tang, & Gregory, 2004),(Hsu & Cao, 1991).

Al_a se compone principalmente de especies monoméricas, de un dímero y trímero como también de algunos polímeros pequeños y especies con reactividad en la superficie se suelen clasificar en esta categoría. Al_b es la especie de polímeros intermedios formados durante la hidrólisis de Al(III), con peso molecular aparentemente en el intervalo de 500 a 3000 daltons. Muchos estudios han confirmado que el contenido del preformado Al_b en los coagulantes poliméricos se correlaciona bien al tridecamero($Al_{13})_4(OH)_{24}^{7+}$, a menudo denotado como Al_{13} (Bertsch & Sposite, 1989). Además, las

especies Al_b preformadas poseen una alta estabilidad cuando se dosifica en el agua bajo ciertas condiciones. Sin embargo, el Al_b formado in situ podría cambiar en Al_c después de un corto período de envejecimiento, pero esta transformación no ha sido plenamente entendida (Wang, Sun, Xu, Tang, & Gregory, 2004).

Al_c es un polímero inerte o son especies coloidales formados durante la hidrólisis de Al (III), con un peso molecular normalmente mayor que 3.000 daltons. Sin embargo, el rendimiento del coagulante se determina por las especies presentes en el momento en que se lleva a cabo el proceso de coagulación y no por las especies presentes en los reactivos originales.

Se ha encontrado que las especies de Al_a son las especies más inestables. Después de la dosificación, estas especies se transforman rápidamente en Al_b y finalmente en Al_c , dependiendo de las condiciones de reacción. Las especies poliméricas y coloidales, una vez preformadas, son relativamente estables. Hay una diferencia significativa entre la estabilidad de las especies Al_b preformadas y las formadas in situ después de la dosificación. Cuanto mayor sea el valor de B de los PACl (OH/Al), menor es la especie Al_a , y es más estable la especiación del Al después de la dosificación, por la formación de especies Al_b .

La influencia de la distribución de especies de Al (III) en la coagulación ha sido de gran interés investigativo durante muchos años. (Hundt & O'Melia, 1988) han estudiado el efecto de la especiación en la eficiencia de la coagulación. Sin embargo, debido a la dificultad analítica de identificar todas las especies de Al y la complejidad de las reacciones entre las especies de Al y la materia orgánica, la interpretación de la remoción de materia orgánica generalmente se basa en

experimentos indirectos y cálculos teóricos de la especiación de Al(III) en solución acuosa(Lu, Chen, & Yang, 1999); (Van Benschoten & Edzwald, 1990).

Históricamente, la coagulación se practicaba optimizando la eliminación de la turbiedad. Sin embargo, los procesos de coagulación también se pueden optimizar para la eliminación MON soluble con dosis más altas de coagulantes y optimización de pH. El valor de pH depende de la alcalinidad del agua cruda y debe tener en cuenta el hecho de que se necesitan dosis más altas coagulantes para reducir el pH en el agua de mayor alcalinidad. Para lograr la eliminación de MON mediante tratamiento convencional, los niveles de pH son: 5,5, 6,3, 7,0 y 7,5 para las aguas con niveles de alcalinidad de 0 - 60,> 60 - 120,> 120 - 240 y> 240 mg/L como CaCO₃, respectivamente (US EPA , 1999a, 2008). Para aguas con baja alcalinidad (<60 mg/L como CaCO₃), con la adición de pequeñas cantidades de coagulante se logra que el pH se encuentre por debajo de su valor objetivo, por tanto se requiere una adición de base para mantener el pH antes de la eliminación de la MON (US EPA, 1999a).

Estudios realizados indican que la eliminación de MON se vuelve más fácil a medida que aumenta la alcalinidad y la MON disminuye. En las aguas de alta alcalinidad, por ejemplo, la depresión pH en el que la eliminación de MON es óptima es más difícil de lograr a través de la adición de solo coagulante. Una posible explicación para el efecto de la alcalinidad en el pH es que la alcalinidad controla el pH en la adición de coagulante, en consecuencia, controla la formación de las especies hidrolizadas con coagulantes metálicos. Cuanto mayor sea la alcalinidad del agua, es más la extensión del proceso de hidrólisis, hay formación de polímeros más grandes de hidróxido metálico, y el aumento de la precipitación. Sin embargo, estas condiciones no benefician necesariamente la mayor eliminación de MON. USEPA también reconoció que el pH de coagulación se determina por la alcalinidad.

Para garantizar una buena eliminación de materia orgánica, las plantas de tratamiento de agua deben tener sustancias químicas que ayuden a regular el pH. Esto podría justificarse por el hecho de que cuando se añaden coagulantes metálicos en el agua cruda, que actúan como ácidos, afectan el pH dependiendo de la dosis y la capacidad amortiguadora del agua.

2.1 Mecanismos principales para la hidrólisis-polimerización

Una revisión de la química de la hidrólisis del aluminio revela que existen dos tipos de mecanismos principales para la hidrólisis-polimerización. El más popular es el "núcleo-link" o esquema de anillo hexamérico, además del modelo más reciente de la formación polinuclear que implica una especie típica tridecamérica, $(Al_{13})_4(OH)_{24}^{7+}$ (normalmente simplificado como Al_{13}). En el primer modelo la unidad básica para la formación del aluminio polinuclear, es la formación de cualquiera de las especies $[Al_6(OH)_{12}(H_2O)_{12}]^{6+}$ (un solo anillo) o el $Al_{10}(OH)_{22}(H_2O)_{16}^{8+}$ (doble anillo) (Hsu, Aluminum hydroxides and oxyhydroxides,, 1989). La característica principal de este modelo es que las especies de hidrólisis pueden formarse continuamente de monómero a polímero por el crecimiento bidimensional de las unidades de anillo hexaméricas. Por lo tanto, se pueden formar muchas especies polinucleares posibles. Las principales especies entonces dependerán principalmente de las condiciones experimentales. En esencia, el anillo hexamérico básico o modelo "núcleo-link" fue originalmente propuesto como una extensión lógica de estado sólido, estructura trihidróxido de aluminio cristalino. Aunque no existe una verificación directa de todas las posibles estructuras, el modelo ganó la aprobación y es muy popular sobre todo en el área de la geoquímica y la química del suelo, ya que los polímeros resultantes prefiguran la estructura del cristal polimorfo de trihidróxido de aluminio, la gibbsita, bayerita, y nordstrandita (Dongsheng, Wei, Yi, Hongxiao, & Gregory, 2004).

Estudios más recientes, basados en la medición directa por RMN ^{27}Al y difracción de rayos X de pequeño ángulo, propusieron el modelo de formación polinuclear. Se postula que sólo existen varias especies posibles en solución y transformación directa entre ellos, tales como monómeros, dímeros, tridecameros (Al_{13}), y agregados. La existencia de un tridecamero con una estructura llamada Keggin ha sido verificada por varios investigadores (Baes & Mesmer, 1976), (Aveston, 1965). Esta especie se forma rápida e irreversiblemente cuando el átomo de Al central en coordinación tetraédrica $\text{Al}(\text{OH})_4^{1-}$ interactúa con 12 iones de aluminio octaédricamente coordinados, y no se transforma en el envejecimiento a través de intermediarios de polímeros como sugiere (Baes & Mesmer, 1976).

(Akitt & Farthing, 1981) propusieron un mecanismo de formación polinuclear Al_{13} en el cual seis especies diméricas nuclean alrededor de $\text{Al}(\text{OH})_4^{1-}$. Sin embargo, varias incertidumbres permanecen en este modelo. Aun no puede explicar todo el proceso de la formación de especies, distribución y transformación. Hay algunas especies al lado de la concentración total de aluminio que no puede ser detectada utilizando la técnica RMN ^{27}Al . Y el mecanismo para su posterior transformación de la estructura Al_{13} de trihidróxido de aluminio está todavía por confirmar, aunque se han hecho algunos avances en este sentido (Bradley, Kydd, & Yamdagni, 1990), (Bottero, y otros, 1987). Independientemente, basado en la detección directa del instrumento, el modelo Al_{13} ha ganado más y más aprobación.

Diversos estudios muestran que la especie Al_{13} es la de mayor eficiencia en los procesos de coagulación y la más estable en el tratamiento de aguas crudas y aguas residuales (Jiang & Graham, 1998), (Tang & Luan, Features and mechanism for coagulation flocculation process of polyaluminum

chloride, 1995)., por lo que la bondad de un coagulante prepolimerizado se podrá evaluar en función de la proporción de Al_3 o Al_b que contenga (Akitt, Greenwood, Khandelwal, & Lester, 1972). La especie Al_3 tiene una estructura constituida por un Al tetrahédrico (Al^{IV}) y 12 octahédricos (Al^{VI}), tal como describen Johansson y Akitt *et al.* (Fig.9) (Galeano *et al.*, 2014):

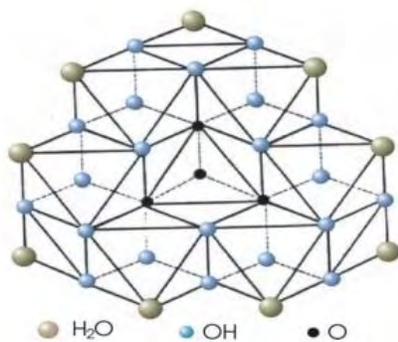


Figura 9.Estructura del polihidroxicación Keggin (Al_{13}).

La estructura Al_{13} -Keggin tiene un radio de aproximadamente 2,5 nm(Peng, Hu, Chen , & Wang, E.B, 2001),(Thang, 1998); y es estable en soluciones acuosas, pero menos estable en soluciones con un pH más alto donde se hidroliza a una bayerita- $Al(OH)_3$ (Wang & Muhammed, 1999). Las especies Al_{13} se agregan fácilmente entre sí para formar agregados con tamaños que van desde decenas a cientos de nanómetros (Thang, 1998).

3 MARCO LEGAL

3.1 Legislación Colombiana para la calidad del agua para consumo humano

3.1.1 Características físicas del agua.

El agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:

Tabla 4. Características físicas del agua para el consumo humano (Sistema Único de Información de Servicios Públicos (2007)).

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino y Cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable o No aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelometricas de turbiedad (UNT)	2

3.2 Conductividad.

El valor máximo aceptable para la conductividad puede ser hasta 1000 microsiemens/cm. Este valor podrá ajustarse según los promedios habituales y el mapa de riesgo de la zona. Un incremento de los valores habituales de la conductividad superior al 50 % en el agua de la fuente, indica un cambio sospechoso en la cantidad de sólidos disueltos y su procedencia debe ser investigada de inmediato por

las autoridades sanitaria y ambiental competentes y la persona prestadora que suministra o distribuye agua para consumo humano (Sistema Único de Información de Servicios Públicos (2007)).

3.3 pH

El valor para el pH del agua para consumo humano, deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0.

3.4 Características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.

Las características químicas del agua para el consumo humano en relación con los elementos y compuestos químicos que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud se señalan a continuación:

Tabla 5. Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones indirectas sobre la salud humana (Sistema Único de Información de Servicios Públicos (2007)).

Elementos y compuestos químicos	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad total	CaCO ₃	200
Cloruros	Cl ⁻	250
Aluminio	Al ³⁺	0,2
Dureza total	CaCO ₃	300

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar el uso de bicarbonato de sodio como agente alcalinizante y su efecto sobre la eficiencia del proceso de coagulación/floculación con hidroxiclورو de aluminio, en la eliminación de color y turbiedad de las mezclas de agua provenientes de Río Bobo y quebrada Las Piedras.

4.2 Objetivos específicos

Determinar la dosis óptima de bicarbonato de sodio de acuerdo a las características del agua de abastecimiento antes del proceso de coagulación.

Encontrar la correlación entre el efecto de los factores dosis de coagulante, hidroxiclورو de aluminio y dosis de alcalinizante bicarbonato de sodio sobre la eficiencia del proceso de coagulación/ floculación en las fuentes hídricas a estudiar.

Analizar la influencia de la adición de bicarbonato de sodio sobre los parámetros de alcalinidad, pH y conductividad en el agua cruda.

5 METODOLOGÍA

5.1 Toma de muestra de agua cruda para los ensayos de prueba de jarras

Se realizaron dos muestreos tipo puntual: para el primero se tomaron 40 L del agua cruda del embalse Río Bobo en un punto definido por la empresa EMPOPASTO S.A.E.S.P. y para el segundo 80 L de agua superficial de la quebrada Las Piedras, que se tomó en el tanque de abastecimiento del corregimiento Cruz de Amarillo. La recolección de muestras se realizó una vez en semana durante un periodo de dos meses. El procedimiento para la toma de muestras se describe en el anexo A.

5.2 Diseño experimental

El desarrollo experimental se ajustó a un diseño de bloques completos aleatorizados debido a que existe una fuente de variación adicional (un factor perturbador) que puede y debe ser sistematizada y controlada durante el experimento. Se realizaron 4 diseños experimentales correspondientes a cada composición de las mezclas de agua analizadas, las cuales se fijaron teniendo en cuenta los diferentes escenarios de caudales que se pueden presentar en la operación de la planta. Las composiciones en % volumen se indican a continuación:

Tabla 6. Composiciones de las mezclas de agua analizadas en el laboratorio.

Composición	% Volumen Las Piedras	% Volumen Rio Bobo
1	100	0
2	80	20
3	60	40
4	40	60

Para cada composición, se identificó como factor de estudio la dosis de alcalinizante y como factor de bloqueo el material experimental. Teniendo en cuenta que la dosis de coagulante no fue

objeto de estudio pero incidió en el resultado de las 5 respuestas, fue definida como una covariable influyente de manera simultánea sobre la eficiencia del sistema junto con la dosis de alcalinizante.

Los parámetros de respuesta del diseño experimental fueron: pH, Color aparente (APHA, AWWA, WPCF, Standard Methods 2120D, (2005)), turbiedad, alcalinidad y conductividad. El efecto de los dos factores y de la covariable se estudiaron según el modelo dado por el programa STATGRAPHICS-Centurion XVI.2 en 72 ejecuciones (basado en 1 réplicas) dividido en 6 bloques tal como se indica a continuación:

Tabla 7.Matriz experimental correspondiente a la composición 1 de los seis muestreos realizados.

Ejec	B	D.C ppm	D. A ppm	pH	A (mg/L CaCO3)	C (µS/cm)	% R.C	% R.T	Ejec	B	D.C ppm	D. A ppm	pH	A (mg/L CaCO3)	C (µS/cm)	% R.C	% R.T
1	1	40	0	7,32	13,1	46,9	69,7	53,42	37	4	94	0	7,32	8,1	38,5	88,46	52,86
2	1	40	0	7,33	13,3	46,8	68,18	52,56	38	4	94	0	7,32	9,2	38,4	85,9	53,33
3	1	40	5	7,34	16,2	51,8	78,79	52,14	39	4	94	5	7,29	13,9	43,5	93,59	85,71
4	1	40	5	7,39	16,5	51,8	80,3	50,85	40	4	94	5	7,29	12,3	43,6	92,31	84,76
5	1	40	10	7,38	19,6	57,6	80,3	50,85	41	4	94	10	7,31	14,6	48,6	91,02	47,62
6	1	40	10	7,42	19,2	57,7	80,3	51,28	42	4	94	10	7,3	14,9	48,7	91,02	48,01
7	1	40	15	7,43	22,1	62,5	81,81	56,41	43	4	94	15	7,34	17,7	54,6	89,74	43,81
8	1	40	15	7,46	22,4	62,2	83,33	58,12	44	4	94	15	7,35	17,4	54,7	89,74	45,23
9	1	40	20	7,45	24,4	66,3	80,3	36,75	45	4	94	20	7,38	21,2	59,6	85,9	45,71
10	1	40	20	7,48	24,2	66,4	84,84	37,61	46	4	94	20	7,37	20,8	59,8	84,61	46,19
11	1	40	25	7,47	27,3	73,8	83,33	56,84	47	4	94	25	7,43	22,5	64,9	87,18	46,66
12	1	40	25	7,32	27,1	73,9	86,36	55,98	48	4	94	25	7,42	22,8	64,8	88,46	46,66
13	2	37	0	7,37	11,9	41,4	67,27	48,51	49	5	170	0	7,5	13,8	78	90,91	70,37
14	2	37	0	7,36	12,3	41,6	65,45	49,36	50	5	170	0	7,53	13,6	78,3	87,01	70,7
15	2	37	5	7,32	15,8	47,5	70,91	43,4	51	5	170	5	7,2	14,6	85,5	92,21	81,14
16	2	37	5	7,3	16,1	47,7	69,09	44,25	52	5	170	5	7,21	14,8	85,7	90,91	81,82
17	2	37	10	7,37	16,9	50,8	72,72	53,62	53	5	170	10	7,22	17,9	90	93,51	83,17
18	2	37	10	7,35	17,2	50,9	74,54	54,47	54	5	170	10	7,24	17,5	90,1	92,21	82,49
19	2	37	15	7,39	21	57,7	78,18	59,57	55	5	170	15	7,27	21,7	95,4	96,1	84,85
20	2	37	15	7,37	21,4	57,9	80	60,42	56	5	170	15	7,26	21,2	95,5	96,1	84,17
21	2	37	20	7,43	23,8	63,2	70,91	54,47	57	5	170	20	7,41	23,8	100,8	87,01	87,88
22	2	37	20	7,43	24,1	63,3	74,54	55,32	58	5	170	20	7,38	23,6	100,9	84,41	88,55
23	2	37	25	7,48	27,6	69,5	78,18	53,62	59	5	170	25	7,43	26,3	106,5	94,8	83,5
24	2	37	25	7,48	27,7	69,56	81,81	53,2	60	5	170	25	7,42	25,9	106,8	93,51	84,51
25	3	44	0	7,18	11,8	48,6	62,9	51,75	61	6	40	0	6,71	8,5	39,4	65,22	50,22
26	3	44	0	7,2	11,4	48,5	64,52	52,2	62	6	40	0	6,73	8,54	39,6	63,04	49,77
27	3	44	5	7,17	14,3	50,6	74,2	58,33	63	6	40	5	6,79	11,8	43,8	69,57	63,11
28	3	44	5	7,18	14,1	50,7	74,19	58,77	64	6	40	5	6,8	12,6	43,5	69,56	62,22
29	3	44	10	7,19	19,2	53,8	74,2	59,65	65	6	40	10	6,91	15	50,4	76,09	67,11
30	3	44	10	7,2	18,9	53,9	75,81	60,53	66	6	40	10	6,9	15,3	50,2	73,91	66,22
31	3	44	15	7,23	22,5	58,7	79,03	64,03	67	6	40	15	6,97	18,7	54,2	80,43	71,11
32	3	44	15	7,24	22,1	58,7	80,64	64,47	68	6	40	15	6,98	18,9	54,3	84,78	70,66
33	3	44	20	7,25	26,6	65,7	75,81	60,09	69	6	40	20	7,04	22,9	60,1	73,91	75,55
34	3	44	20	7,26	26,2	65,6	77,42	60,96	70	6	40	20	7,06	22,2	60	76,09	74,22
35	3	44	25	7,33	28	70,4	74,2	53,07	71	6	40	25	7,1	23,5	64,9	67,39	73,77
36	3	44	25	7,35	28,2	70,3	75,81	53,51	72	6	40	25	7,08	23,8	64,7	65,22	72,44

B: Bloques; D.C: Dosis de Coagulante; D.A: Dosis de Alcalinizante; A: Alcalinidad; C: Conductividad; R.C: Remoción de color; R.T: Remoción Turbiedad.

Tabla 8. Matriz experimental correspondiente a la composición 2 de los seis muestreos realizados.

Ejec	B	D.C ppm	D. A ppm	pH	A (mg/L CaCO ₃)	C (µS/cm)	% R.C	% R.T	Ejec	B	D.C ppm	D. A ppm	pH	A (mg/L CaCO ₃)	C (µS/cm)	% R.C	% R.T
1	1	44	0	7,82	14,5	54,5	80,72	75,53	37	4	44	0	7,07	15,1	47,8	85,23	72,02
2	1	44	0	7,83	14,1	54,5	78,31	75,77	38	4	44	0	7,09	14,9	42	89,77	73,81
3	1	44	5	7,74	16,1	56,2	83,13	64,13	39	4	44	5	7,11	14,4	42,1	79,54	74,11
4	1	44	5	7,75	15,8	56,3	84,34	63,66	40	4	44	5	7,17	16	52,8	81,81	68,15
5	1	44	10	7,32	17,1	59,1	84,34	73,87	41	4	44	10	7,08	15,3	47,6	86,36	72,62
6	1	44	10	7,34	17,2	59,2	86,75	73,63	42	4	44	10	7,27	18,8	56,7	80,68	66,96
7	1	44	15	7,33	19,6	62,8	87,96	78,14	43	4	44	15	7,3	21,4	61,1	82,95	73,21
8	1	44	15	7,32	19,3	62,8	87,95	77,43	44	4	44	15	7,31	24	69,2	84,09	70,54
9	1	44	20	7,34	22,3	70,4	90,37	81	45	4	44	20	7,16	16,7	52,9	84,09	68,45
10	1	44	20	7,35	22,6	70,3	89,16	80,28	46	4	44	20	7,32	24,3	69,4	82,95	70,83
11	1	44	25	7,39	24,4	73,6	89,16	79,81	47	4	44	25	7,31	21,7	61,3	85,23	72,32
12	1	44	25	7,37	24,7	73,5	91,56	79,33	48	4	44	25	7,27	18,8	56,6	87,5	66,66
13	2	40	0	7,29	10,6	54,5	75,67	53,16	49	5	87	0	6,93	13,6	76,5	80	66,48
14	2	40	0	7,3	10,9	54,6	72,97	52,89	50	5	87	0	6,87	13,2	76,7	78,82	65,94
15	2	40	5	7,28	14,3	56,2	81,08	62,37	51	5	87	5	7,01	14,3	80,5	82,35	69,75
16	2	40	5	7,27	14,5	56,3	81,08	62,37	52	5	87	5	6,98	14,5	80,6	80,5	69,21
17	2	40	10	7,29	16,9	59,1	79,73	59,47	53	5	87	10	6,99	16,7	87,7	85,88	73,28
18	2	40	10	7,28	17,1	59,2	81,08	58,95	54	5	87	10	7,03	16,9	87,8	84,71	73,02
19	2	40	15	7,31	19,4	62,8	85,14	63,16	55	5	87	15	7,03	19,1	92	89,41	75,2
20	2	40	15	7,3	19,6	62,7	86,49	63,42	56	5	87	15	7,04	18,8	92	90,59	75,48
21	2	40	20	7,33	23,5	70,4	82,43	72,11	57	5	87	20	7,04	21,5	97	91,76	74,39
22	2	40	20	7,32	23,1	70,2	83,78	72,63	58	5	87	20	7,06	21,3	97,1	91,76	73,84
23	2	40	25	7,37	24,9	73,6	81,08	66,84	59	5	87	25	7,06	23,9	101,9	94,12	82,83
24	2	40	25	7,35	25,6	73,5	82,43	67,1	60	5	87	25	7,09	23,8	101,8	96,47	81,74
25	3	40	0	7,1	12,8	44,7	73,42	65,31	61	6	37	0	7,22	11,2	40,3	72,06	63,03
26	3	40	0	7,09	13,1	44,6	72,15	65,58	62	6	37	0	7,24	11,4	40,4	73,53	62,32
27	3	40	5	7,07	14,9	49,8	79,75	74,8	63	6	37	5	7,14	14,3	44,5	76,47	65,84
28	3	40	5	7,06	15,2	49,7	79,75	75,07	64	6	37	5	7,13	14,5	44,5	77,94	66,55
29	3	40	10	7,09	17,3	55,4	82,28	75,07	65	6	37	10	7,11	16,5	50	77,94	73,59
30	3	40	10	7,08	17,4	55,2	83,54	75,34	66	6	37	10	7,12	16,8	50,2	80,88	72,89
31	3	40	15	7,13	22,1	61,9	84,81	76,7	67	6	37	15	7,12	21,1	55,3	80,88	59,15
32	3	40	15	7,12	21,9	61,8	83,54	76,42	68	6	37	15	7,1	21,4	55,2	82,35	58,45
33	3	40	20	7,16	25,2	65,4	82,28	75,07	69	6	37	20	7,2	23,1	60,4	76,47	61,27
34	3	40	20	7,15	24,8	65,2	82,28	72,08	70	6	37	20	7,18	23,9	60,5	77,94	60,21
35	3	40	25	7,19	26,6	71,8	79,75	74,8	71	6	37	25	7,21	25,9	66,8	82,35	59,86
36	3	40	25	7,82	14,5	54,5	80,72	75,53	72	6	37	25	7,2	25,7	66,7	83,82	58,8

B: Bloques; D.C: Dosis de Coagulante; D.A: Dosis de Alcalinizante; A: Alcalinidad; C: Conductividad; R.C: Remoción de color; R.T: Remoción Turbiedad.

Tabla 9. Matriz experimental correspondiente a la composición 3 de los seis muestreos realizados.

Ejec	B	D.C ppm	D. A ppm	pH	A (mg/L CaCO ₃)	C (µS/cm)	% R.C	% R.T	Ejec	B	D.C ppm	D. A ppm	pH	A (mg/L CaCO ₃)	C (µS/cm)	% R.C	% R.T
1	1	40	0	7,1	11,5	49	75,73	59,6	37	4	44	0	6,98	10,2	44	87,13	76,99
2	1	40	0	7,09	11,3	49,1	72,81	60,33	38	4	44	0	6,99	10,6	44,2	80,2	77,41
3	1	40	5	6,98	15	56,1	81,55	70,48	39	4	44	5	6,99	13,3	50	88,12	73,85
4	1	40	5	7	14,5	56,2	80,58	69,74	40	4	44	5	7	13,8	50,1	86,14	74,27
5	1	40	10	7,02	16,8	59,7	91,26	80,81	41	4	44	10	7,04	14,9	55,9	85,15	74,69
6	1	40	10	7,03	16,5	59,5	90,29	79,71	42	4	44	10	7,03	15,3	55,7	85,15	74,9
7	1	40	15	7,09	18,7	64	93,2	84,87	43	4	44	15	7,09	18,4	59,3	86,14	76,36
8	1	40	15	7,08	18,6	63,9	92,23	83,76	44	4	44	15	7,09	18,6	59,4	87,13	76,78
9	1	40	20	7,12	22,3	70,1	89,32	88,2	45	4	44	20	7,13	19,3	64,5	82,18	76,15
10	1	40	20	7,13	22,1	69,8	90,29	86,9	46	4	44	20	7,12	19,4	64,7	84,16	76,36
11	1	40	25	7,15	23,6	71,7	88,35	76,01	47	4	44	25	7,23	23,8	69,5	83,17	71,97
12	1	40	25	7,13	22,1	69,8	90,29	86,9	48	4	44	25	7,2	23,3	69,2	85,15	72,8

13	2	40	0	7,14	10,4	54,6	80	69,26	49	5	74	0	7,41	14,3	64,2	86,21	87,01
14	2	40	0	7,16	10,1	54,6	81,05	69,26	50	5	74	0	7,5	14,7	64,1	82,76	86,08
15	2	40	5	7,19	14,1	51,1	81,05	80,54	51	5	74	5	7,42	16	69,8	91,95	89,33
16	2	40	5	7,17	13,9	51,2	83,16	80,93	52	5	74	5	7,39	16,3	69,7	89,65	89,1
17	2	40	10	7,2	17	55,7	83,16	84,43	53	5	74	10	7,42	17,2	71	93,1	89,1
18	2	40	10	7,18	16,8	55,6	84,21	84,63	54	5	74	10	7,4	17,8	71	91,96	88,63
19	2	40	15	7,23	17,4	63,3	87,37	88,72	55	5	74	15	7,41	21,2	80,5	89,65	88,86
20	2	40	15	7,22	17,6	63,2	88,42	89,1	56	5	74	15	7,38	21,4	80,5	88,51	89,56
21	2	40	20	7,26	23,2	66,9	86,32	85,6	57	5	74	20	7,45	22,9	85,9	91,96	91,88
22	2	40	20	7,24	22,8	66,8	87,37	85,99	58	5	74	20	7,47	23,1	85,8	93,1	91,41
23	2	40	25	7,27	25,1	75,6	84,21	83,85	59	5	74	25	7,47	27,5	91,7	94,25	64,5
24	2	40	25	7,26	25,3	75,5	86,31	84,24	60	5	74	25	7,48	27,3	91,6	96,55	65,66
25	3	40	0	6,91	11,9	50,4	81,25	76,71	61	6	37	0	7,21	9,8	42,2	67,1	65,39
26	3	40	0	6,9	12,1	50,3	81,25	76,71	62	6	37	0	7,19	10,2	42,1	68,42	65,12
27	3	40	5	6,94	13,9	51,7	84,42	77,71	63	6	37	5	7,17	12,9	47,4	80,26	77,93
28	3	40	5	6,93	14,2	51,9	86,46	77,51	64	6	37	5	7,16	13,1	47,3	78,95	78,2
29	3	40	10	6,95	17,9	56,2	87,5	77,31	65	6	37	10	7,14	15,6	52,5	81,58	74,39
30	3	40	10	6,96	16,7	56,1	87,5	77,11	66	6	37	10	7,12	15,9	52,6	82,89	74,11
31	3	40	15	6,98	21,2	64,4	88,54	81,73	67	6	37	15	7,15	20,1	57,7	77,63	71,39
32	3	40	15	6,98	20,9	64,2	89,58	81,73	68	6	37	15	7,15	20,5	57,8	76,32	70,84
33	3	40	20	7,03	28	66,9	84,42	76,51	69	6	37	20	7,14	25	62,9	78,95	70,3
34	3	40	20	7,04	27,2	66,9	83,33	76,51	70	6	37	20	7,13	25,9	62,8	81,58	69,75
35	3	40	25	7,08	28,8	73,7	83,33	79,52	71	6	37	25	7,18	27	68,6	81,58	69,75
36	3	40	25	7,09	29,1	73,6	85,42	78,92	72	6	37	25	7,19	27,6	68,4	84,21	69,21

B: Bloques; D.C: Dosis de Coagulante; D.A: Dosis de Alcalinizante; A: Alcalinidad; C: Conductividad; R.C: Remoción de color; R.T: Remoción Turbiedad.

Tabla 10. Matriz experimental correspondiente a la composición 4 de los 6 muestreos realizados.

Ejec	B	D.C ppm	D. A ppm	pH	A (mg/L CaCO ₃)	C (µS/cm)	% R.C	% R.T	Ejec	B	D.C ppm	D. A ppm	pH	A (mg/L CaCO ₃)	C (µS/cm)	% R.C	% R.T
1	1	40	0	7,32	11,6	49,4	79,16	92,28	37	4	40	0	7,3	10,2	44,1	85,84	85,28
2	1	40	0	7,3	11,2	49,6	78,33	92,71	38	4	40	0	7,29	10,4	44,3	83,19	84,78
3	1	40	5	7,18	14,3	53,8	82,5	72,37	39	4	40	5	7,14	12,6	48,9	87,61	85,45
4	1	40	5	7,17	14,1	53,9	80	72,51	40	4	40	5	7,12	12,9	48,9	87,61	85,28
5	1	40	10	7,25	17,2	59,4	84,16	77	41	4	40	10	7,15	13,8	54	84,07	83,61
6	1	40	10	7,23	17,5	59,6	83,33	76,86	42	4	40	10	7,15	14,4	54,1	85,84	83,95
7	1	40	15	7,24	19,7	64,5	87,5	77,84	43	4	40	15	7,2	18,9	60,9	86,73	87,12
8	1	40	15	7,24	19,5	64,6	86,66	77,7	44	4	40	15	7,21	18,7	60,8	88,5	86,79
9	1	40	20	7,3	22,9	69,9	86,66	79,8	45	4	40	20	7,24	21,6	66,7	81,42	83,44
10	1	40	20	7,28	22,2	69,9	85,83	79,52	46	4	40	20	7,25	21,9	66,7	86,73	83,11
11	1	40	25	7,31	25,6	74,3	87,5	82,47	47	4	40	25	7,26	24,1	71,1	87,61	85,12
12	1	40	25	7,3	25,2	74,4	87,5	82,33	48	4	40	25	7,27	24,3	71,2	87,61	84,62
13	2	40	0	7,25	10,8	48,9	86,09	77,83	49	5	57	0	7,27	14,2	59,4	83,33	82,86
14	2	40	0	7,26	10,4	48,8	85,21	77,83	50	5	57	0	7,29	14,4	59,5	85,55	82,86
15	2	40	5	7,17	13,1	49,7	86,96	86,24	51	5	57	5	7,23	16,6	62,7	78,77	87,64
16	2	40	5	7,16	12,9	49,6	87,83	86,39	52	5	57	5	7,21	16,4	62,7	87,77	87,85
17	2	40	10	7,15	13,9	51,9	86,09	87	53	5	57	10	7,24	17,9	69,9	97,77	87,2
18	2	40	10	7,16	13,7	51,9	89,56	87,16	54	5	57	10	7,23	17,8	69,8	95,55	86,98
19	2	40	15	7,16	16,3	58,7	88,7	86,24	55	5	57	15	7,26	22,4	75,1	98,88	85,9
20	2	40	15	7,15	16,1	58,7	90,43	86,7	56	5	57	15	7,26	21,9	75,2	97,77	85,9
21	2	40	20	7,2	23,2	68,3	86,96	86,08	57	5	57	20	7,28	23,5	79,5	98,88	78,31
22	2	40	20	7,21	22,8	68,2	86,95	85,93	58	5	57	20	7,27	23,8	79,4	98,88	78,52
23	2	40	25	7,23	25,2	73,3	87,82	89,45	59	5	57	25	7,33	28,3	85,3	98,88	87,85
24	2	40	25	7,23	24,9	73,4	88,69	89,3	60	5	57	25	7,33	27,6	85,1	98,88	87,64
25	3	40	0	7,14	14	47,4	80,7	74,62	61	6	37	0	7,09	12	44,8	74,47	60,19
26	3	40	0	7,15	14,2	47,4	79,82	74,45	62	6	37	0	7,08	12,1	44,7	76,6	60,9
27	3	40	5	7,11	16,9	52,2	81,58	78,85	63	6	37	5	7,03	14,4	49,1	82,98	70,62
28	3	40	5	7,1	17,1	52,1	82,45	78,85	64	6	37	5	7,04	14,7	49,3	81,91	70,85
29	3	40	10	7,13	18,2	59,4	83,33	81,05	65	6	37	10	7,05	16,2	54,1	85,11	75,59
30	3	40	10	7,12	18,5	59,3	85,09	80,88	66	6	37	10	7,06	16,4	54,2	82,98	75,35
31	3	40	15	7,14	21,9	63,6	86,84	78,85	67	6	37	15	7,06	19,9	60	90,42	80,81
32	3	40	15	7,14	21,7	63,5	87,72	78,68	68	6	37	15	7,07	19,8	60,1	87,77	80,33
33	3	40	20	7,19	24,1	68,4	85,96	79,19	69	6	37	20	7,07	21,5	65,8	92,55	78,2

34	3	40	20	7,18	24,2	68,5	85,96	79,69	70	6	37	20	7,08	21,8	65,6	90,42	77,49
35	3	40	25	7,23	24,8	73,9	86,84	81,73	71	6	37	25	7,1	23,7	69,7	94,68	80,33
36	3	40	25	7,22	25,3	73,8	88,6	81,89	72	6	37	25	7,09	23,4	69,8	93,61	80,57

B: Bloques; D.C: Dosis de Coagulante; D.A: Dosis de Alcalinizante; A: Alcalinidad; C: Conductividad; R.C: Remoción de color; R.T: Remoción Turbiedad.

5.3 Elección del tamaño de la muestra

Para la elección del tamaño de la muestra que debe correrse en el diseño experimental, se acudió a la calculadora de tamaño muestral “GRANMO” (www.imim.es/ofertadeserveis/software-public/granmo/). Los resultados obtenidos con el anterior método fueron corroborados con las curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos fijos.

5.4 Caracterización del agua cruda y determinación de la dosis del coagulante

Con el fin de conocer las características iniciales del agua cruda de ambas fuentes, se tomó 1 L por cada una de las muestras de agua y se midieron los parámetros de: pH, alcalinidad, conductividad, turbiedad y color aparente. Posteriormente se midió la dosis del coagulante hidroxiclورو de Aluminio ACH necesaria para cada una de las composiciones, usando el analizador electrocinético de carga (CCA). Para ello se prepararon cuatro composiciones diferentes (2 L de capacidad en cada jarra) con mezclas de la quebrada Piedras y río Bobo, según la cantidad requerida en cada composición tal como se mencionó anteriormente. A continuación se adicionó lentamente el coagulante hasta que la unidad de carga final indicada en el CCA fuese cercana a cero USC.

5.5 Ensayos de laboratorio usando prueba de jarras

Tabla 11. Parámetros de mezcla rápida y de mezcla lenta utilizados en el laboratorio.

PARAMETROS DE MEZCLA			
Rápida rpm	Tiempo (s)	Lenta rpm	Tiempo (min)
300	10	40	3,5
TIEMPO DE SEDIMENTACION			
Segundos	Minutos	Horas	
-----	20	-----	

Se realizaron cuatro experimentos de pruebas de jarras con su respectiva réplica en el Laboratorio de la Planta de tratamiento de agua de Mijitayo, EMPOPASTO S.A. E.S.P. Para cada experimento, se prepararon las mezclas de agua necesarias según las composiciones ya mencionadas anteriormente, con un volumen de 2 L por ensayo (seis al tiempo). A continuación se adicionaron diferentes concentraciones de alcalinizante sobre las muestras de agua (tabla 12) y se agitaron por treinta segundos hasta asegurar su disolución completa con una velocidad de 300 r.p.m.

Posteriormente se añadieron concentraciones iguales del coagulante a cada ensayo de jarras según la cantidad indicada por el CCA. Los parámetros de mezcla rápida y de mezcla lenta utilizados en el laboratorio se indican en la tabla 11. Inmediatamente cuando se agregó el alcalinizante y el coagulante se procedió a medir el pH en cada ensayo de jarras con el fin de conocer el rango de pH óptimo de coagulación, como también el efecto del ACH y del bicarbonato de sodio sobre el pH del agua cruda. Las muestras resultantes se dejaron reposar por 20 minutos aproximadamente para que sedimente el floc.

Se estudiaron 5 dosis de bicarbonato de sodio en la prueba de jarras como agente alcalinizante y una jarra de control (ensayo 1) la cual no se alcalinizó, determinando la mejor dosis de las cinco concentraciones evaluadas en términos de porcentaje de eliminación de color aparente, en los procesos de coagulación/floculación.

Tabla 12. Dosis de alcalinizante agregada en los ensayos de laboratorio usando prueba de jarras.

No. Ensayo de jarras	Concentración NaHCO ₃ (ppm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25

La composición química y algunas especificaciones de los reactivos hidroxiclورو de aluminio y bicarbonato de sodio se resume a continuación.

Tabla 13. Especificaciones químicas de los reactivos usados en el laboratorio.

Reactivo	Parámetro	Unidades	Especificación	Valor Típico
Hidroxiclورو de Aluminio	Aluminio (Al ₂ O ₃)	%	18,0 – 22,0	20,0
	Basicidad	%	Min. 70,0	72,0
	Densidad	g/mL	1,25 – 1,35	1,34
	Turbiedad	NTU	Max. 50,0	17
	pH			2,4
Bicarbonato de Sodio	Pureza total como NaHCO ₃	%	99,0 – 101,0	-----
	NaHCO ₃	%	93,0 – 99,0	-----

5.6 Evaluación de los parámetros de respuesta en el agua tratada

5.6.1 Determinación de Color Aparente (CA)

El término “color aparente” engloba no solo el color debido a sustancias disueltas sino también a las materias en suspensión y se determina en la muestra original sin filtrarla o centrifugarla. (APPA-AWWA-WEF, 2005) Se utilizó agua ultra pura para ajustar el “blanco” y se procedió a medir el color aparente tomando una muestra de 100 mL de agua tratada de cada una de las jarras. Para ello se realizó la lectura de absorbancia a 455 nm, usando un espectrofotómetro HACH DR 6000.

5.6.2 Determinación de la turbiedad

La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que hace que los rayos luminosos se dispersen o se absorban, en lugar de que se transmitan sin alteración a través de una muestra (AWWA-

WEF, 2005). Se procedió a medir la turbiedad, tomando una muestra de 100 mL de agua tratada de cada una de las jarras. Se realizó la lectura directa en el equipo usando un turbidímetro HACH DR 700 que opera bajo el principio de la luz dispersada o reflejada en un ángulo recto por las partículas suspendidas en un líquido. Esta luz dispersada es registrada por fotoceldas y es directamente proporcional a la turbiedad.

5.6.3 Determinación del pH

Para cada uno de los ensayos de jarras, se midieron 100 mL de agua tratada y se realizó la lectura directa en el equipo. Para ello se utilizó un pH-metro 744, provisto de un electrodo de vidrio, el cual posee una membrana que mide el cambio eléctrico en mV y presenta los resultados en la escala de unidades de pH.

5.6.4 Determinación de la alcalinidad total

Para cada uno de los ensayos de jarras, se midieron 100 mL de agua tratada los cuales se llevaron a un erlenmeyer de 250mLy se añadieron 3 gotas del indicador Tashiro. Posteriormente se tituló en forma regular por la adición de pequeños volúmenes de H₂SO₄ 0,02 N hasta el viraje a color púrpura; para ello se utilizó una bureta digital, que hace mediciones precisas para análisis volumétricos. Para calcular la alcalinidad total presente en cada muestra se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad total como CaCO}_3 \text{ en mg/L} = \frac{A \times N (50)(1000)}{100} \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

A es el volumen total en mL gastado de ácido en la titulación al viraje con el indicador

N es la normalidad de la disolución del ácido

100 es el volumen de la muestra en mL

50 es el factor para convertir eq-g/L a mg/L de CaCO₃

1000 es el factor para convertir de mg a g

5.6.5 Determinación de la conductividad

Para cada uno de los ensayos de jarras, se midieron 100 mL de agua tratada y se realizó la lectura directa en el equipo. Para ello se utilizó un conductímetro THERMO SCIENTIFIC Orion 3-Star Plus, que es un instrumento específicamente diseñado para la rápida medición de la conductividad eléctrica en líquidos y la actividad eléctrica en suelos o sustratos.

Todos los datos de laboratorio se registraron en un formato donde se especificó las condiciones iniciales del agua cruda de las dos fuentes hídricas y las condiciones finales después de haber adicionado el alcalinizante y el coagulante como se indica en el Anexo 5 (formato de registro de laboratorio).

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de conocer el efecto del bicarbonato de sodio como agente alcalinizante sobre la eficiencia del proceso de coagulación/floculación con ACH, en la eliminación de color aparente y turbiedad como también su influencia sobre los parámetros de alcalinidad, pH y conductividad de las mezclas de agua provenientes del embalse Río Bobo y quebrada Las Piedras, se realizaron ensayos de jarras para evaluar las dosificaciones más eficientes en las muestras de agua cruda. Los datos de cada muestra tomados fueron organizados en las tablas del 1 al 24 y la información recolectada corresponde a la medición de dichos parámetros tomados antes de los ensayos y una vez terminados como se indica en el anexo 5.

Los datos se analizaron a través del paquete estadístico STATGRAPHICS-Centurion XVI.2, para obtener una evaluación de su comportamiento sobre los ensayos realizados y poder establecer cuál es la mejor dosis de bicarbonato de sodio de las 5 concentraciones evaluadas como también conocer la correlación con el coagulante utilizado (ACH).

Para determinar si los factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre cada uno de los parámetros de respuesta, se realizó un análisis de varianza, los resultados estadísticos observados para cada composición se indican a continuación:

Tabla 14. Análisis de varianza de los factores: “dosis de alcalinizante” y “material experimental” para cada una de las respuestas medidas en el laboratorio.

<i>Efectos principales</i>	Composición 1	Composición 2	Composición 3	Composición 4
Dosis Alcalinizante	Sig. Valor-P	Sig. Valor-P	Sig. Valor-P	Sig. Valor-P

Color	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Turbiedad	*	0,0173	*	0,0004	*	0,0008	*	0,0000
pH	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Conductividad	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Alcalinidad	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Bloques**								
Color	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Turbiedad	*	0,0000	*	0,0004	*	0,0008	*	0,0000
pH	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Conductividad	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Alcalinidad	*	0,0000	*	0,0145	*	0,0000	*	0,0000

* indica una diferencia significativa; ** Material experimental

En la tabla 14 se resume la ANOVA de cada una de las composiciones descomponiendo la variabilidad de cada uno de los parámetros medidos en el laboratorio. Los valores-P prueban la significancia estadística y si estos son menores que 0,05, las cinco dosis de alcalinizante y el material experimental (bloques) tienen un efecto estadísticamente significativo sobre cada uno de los parámetros con un 95,0% de nivel de confianza.

Para la composición 4 se observó que el parámetro de porcentaje de remoción de turbiedad no cumplió con los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza por este motivo se realizó la prueba de FRIEDMAN dando como resultado que si tiene varianzas significativas tal como se indica a continuación:

	Hipótesis nula	Test	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Dosis Alcalinizante, % Remocion de Turbiedad and Bloques son lasangos de mismas.	Análisis de dos vías de Friedman de varianza por muestras relacionadas	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es ,0

Figura 10. Resumen de la hipótesis por medio de la prueba de FRIEDMAN.

Teniendo en cuenta que la covariable “dosis de coagulante” es influyente de manera simultánea sobre la eficiencia del sistema junto con la dosis de alcalinizante, se realizó un análisis de varianza. En

la tabla 15 se resume la ANOVA multifactorial indicando que la covariable dosis de coagulante tiene un efecto estadísticamente significativo sobre cada una de las respuestas, puesto que se encontró que los valores-P son menores que 0,05.

Tabla 15. Análisis de varianza de la covariable dosis de coagulante para cada una de las respuestas medidas en el laboratorio.

	Composición 1		Composición 2		Composición 3		Composición 4	
	Sig.	Valor-P	Sig.	Valor-P	Sig.	Valor-P	Sig.	Valor-P
Color	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Turbiedad	*	0,0000	*	0,0112	*	0,0000	*	0,0027
pH	*	0,0015	*	0,0001	*	0,0000	*	0,0000
Conductividad	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000	*	0,0000
Alcalinidad	*	0,0104	*	0,0132	*	0,0035	*	0,0000

* indica una diferencia significativa.

Estudios indican que la alcalinidad afecta de manera directa el proceso de coagulación, por tanto para conocer la correlación del factor dosis de alcalinizante (bicarbonato de sodio) con la covariable dosis de coagulante se realizó un estudio multivariado encontrando que no hay una correlación significativa tal como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 16. Correlaciones entre el factor dosis de alcalinizante y la covariable dosis de coagulante.

	Dosis Alcalinizante	Dosis Coagulante
Dosis Alcalinizante		0,0000 *
		(72) **
		1,0000 ***
Dosis Coagulante	0,0000 *	
	(72) **	
	1,0000 ***	

*Correlación; ** (Tamaño de Muestra); ***Valor-P

La tabla 16 muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Los pares de variables tienen valores-P por debajo de 0,05, que indica que no hay una correlación entre ellas.

6.1 Elección del tamaño de la muestra

Para el desarrollo experimental fue necesaria la elección del tamaño de la muestra que debe correrse en el diseño, con el fin de conocer su sensibilidad. Para ello se usó la calculadora de tamaño muestral “GRANMO” con un nivel de significancia de 0,05, arrojando una potencia de prueba de 0,92. Para corroborar el valor de la potencia de la prueba calculada anteriormente, se acudió a las curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos fijos, usando la siguiente fórmula:

$$\phi^2 = \frac{b \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2} \text{ (Ecuación 2)}$$

hay $a-1$ grados de libertad en el numerador y $(a-1)(b-1)$ grados de libertad en el denominador.

Donde: a = el número de tratamientos; b = es el número de bloques; $\tau_i^2 = (\mu - \bar{x}_i)^2$ es el efecto del i ésimo tratamiento, siendo μ la media global y \bar{x}_i la media de cada uno de los tratamientos; σ = cuadrado medio (Anexo 3).

Para ello se verificó en las tablas de múltiples rangos de los resultados estadísticos de cada uno de los parámetros medidos en el laboratorio, encontrándose que la media de la conductividad tenía una dispersión más grande que el resto de los parámetros; por tanto se realizaron los cálculos respectivos

tomando los datos la conductividad de la composición 2, puesto que en esta composición el valor de φ encontrado fue factible de ser interpretado al efectuar la respectiva interpolación en los gráficos de las curvas de operación característica (Anexo 3), arrojando un valor de 1,82; con grados de libertad del numerador igual a 5 ($V_1 = a-1$) y grados de libertad en el denominador igual a 25 ($V_2 = (a-1)(b-1)$).

Las curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos fijos, indica que el riesgo β correspondiente es aproximadamente 0,082 con una potencia de prueba $(1 - \beta)$ igual a 0,92 (ver anexo4).

6.2 Efecto regulador de pH usando NaHCO_3

Se llevaron a cabo experimentos de prueba de jarras para conocer el efecto regulador del pH sobre la eficiencia de la prealcalinización con bicarbonato de sodio y la coagulación con ACH. La dosis de ACH agregada fue de acuerdo a los requerimientos del analizador electrocinético de carga para las cuatro composiciones de mezclas de agua; variando las concentraciones de bicarbonato, tal como lo indica la tabla 12.

El promedio del pH en el agua cruda para las cuatro composiciones de mezclas de agua según los muestreos realizados se indica a continuación:

Tabla 17. pH del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.

Composición	Muestreo						Promedio
	1	2	3	4	5	6	
1	8,65	9,09	8,84	8,75	9,85	8,34	8,92
2	8,51	8,90	8,71	8,56	9,54	7,99	8,70
3	8,29	8,6	8,47	8,31	9,37	7,87	8,49
4	8,18	8,40	8,41	8,43	9,35	9,12	8,40

En los experimentos de prueba de jarras se encontró que al agregar bicarbonato de sodio, hubo una variación del pH en cada uno de los ensayos para las cuatro composiciones, aumentando hasta cerca de una unidad (para el caso de los ensayos de jarras 5 y 6) donde la dosificación del alcalinizante fue más alta.

Posteriormente, cuando se adicionó la dosis del ACH (medida en el CCA) en cada uno de los ensayos de jarras, el pH disminuyó drásticamente hasta llegar a un pH en el intervalo de 4,25 - 5,50 para los ensayos 1 y 2; para los ensayos 3 y 4 se observó un cambio de pH entre 6,0 y 6,70 y finalmente para los ensayos 5 y 6 el cambio de pH no varió de manera significativa, esto se explica porque en estos ensayos, el bicarbonato actuó como un buffer, manteniendo el pH entre 7,12 – 7,60.

En la tabla 18 se observa el pH final (después del proceso de coagulación) de los ensayos de jarras con la dosis de 15 ppm de alcalinizante, debido a que fue la mejor dosis de bicarbonato de las 5 concentraciones evaluadas en el laboratorio, puesto que presentó un mayor porcentaje de eliminación de color aparente para todas las composiciones (ver fig. 12). Cabe resaltar que la eficiencia del proceso de coagulación/floculación con ACH se evaluó en términos de porcentaje de remoción de color aparente, debido a que los valores de turbiedad, alcalinidad, pH y conductividad para todas las dosis evaluadas en las cuatro composiciones de mezclas de agua, no sobrepasaron los valores máximos aceptables y por tanto cumplieron con la normatividad vigente de protección y control de calidad del agua apta para consumo humano (Decreto 1575 de 2007 Ministerio de la Protección Social y su normatividad conexas).

Tabla 18. Pruebas de múltiples rangos para el pH final de la dosis de alcalinizante de 15 ppm de cada una de las composiciones.

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Casos	Media LS	Sigma LS	Composición
12	7,27	0,021	1
12	7,20	0,013	2
12	7,15	0,011	3
12	7,18	0,006	4

En la figura 11 se indica la variación del pH final después del proceso de coagulación con ACH a las diferentes dosis de alcalinizante evaluadas.

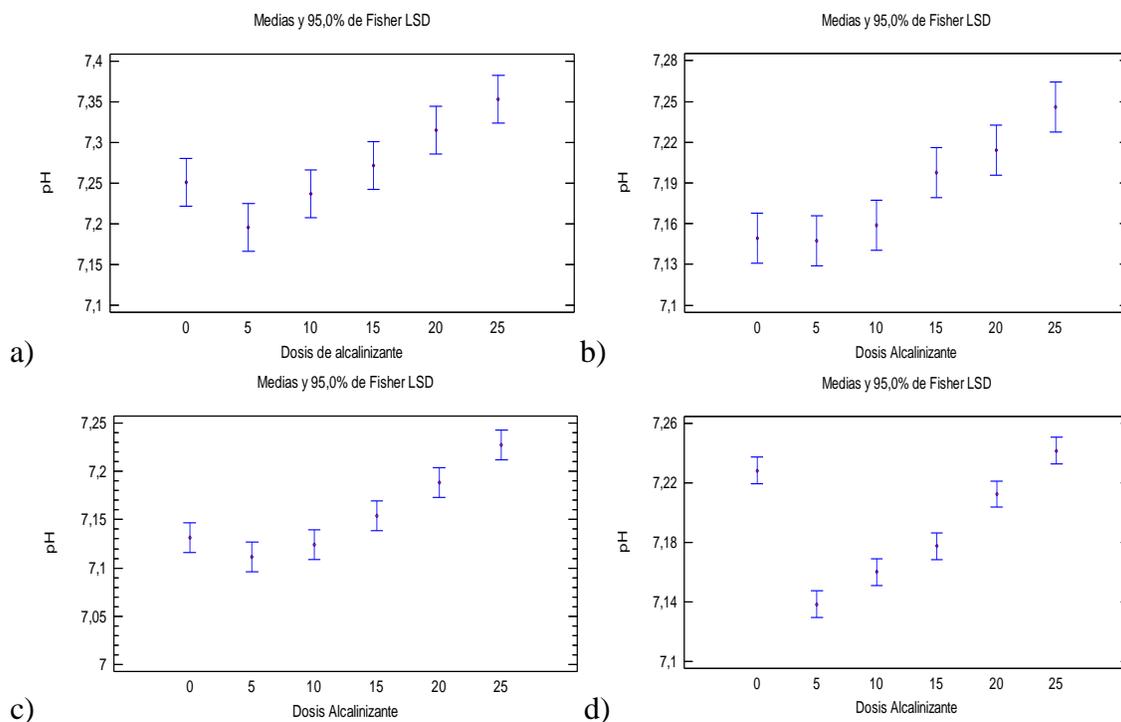


Figura 11. Medias de la dosis de alcalinizante sobre el pH final para cada una de las composiciones. a) Composición 1; b) Composición 2; c) Composición 3 y d) Composición 4.

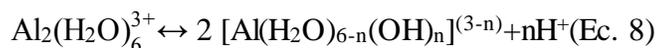
Se observan menores valores de pH final en las cuatro composiciones de mezclas de agua cuando se adicionó una concentración de alcalinizante de 5 ppm en comparación a los ensayos en los

cuales no se alcalinizó. Es importante tener en cuenta que el coagulante reacciona con el agua para producir iones de hidrogeno libres (ver ecuación 8), los cuales reaccionan con las especies responsables de la alcalinidad presente en el agua reduciendo el pH. Cabe resaltar que si el agua contiene una alcalinidad insuficiente, la adición de un coagulante metálico desciende el pH por debajo del rango de pH óptimo de coagulación y por tanto el proceso de clarificación del agua no será efectivo.

Este comportamiento del descenso de pH en los ensayos en los cuales se adicionaron bajas concentraciones de bicarbonato (5 ppm), puede ser debido a que en estos ensayos hubo una mayor hidrólisis del coagulante por la adición de alcalinidad y por tal motivo posiblemente se formaron mas especies de tipo Al_b las cuales para su formación requieren un consumo de alcalinidad adicional.

Es necesario anotar que hay mayor consumo de grupos OH cuando las fracciones de Al_a se transforman en Al_b y mucho mayor cuando estas se transforman hasta Al_c .

El Al (III) es un catión con grado de hidrólisis moderada que perturba el equilibrio de disociación del agua y produce un aumento de la concentración de H^+ , quedando la solución ácida. El complejo $Al(H_2O)_3(OH)_3$ (especie polimérica formada a $pH < 5$) puede reaccionar con H^+ u OH^- mostrando sus características anfotericas. En condiciones de pH ácido, este complejo acuoso permanece intacto, ya que la actividad de los H^+ es alta. Con otros cationes metálicos, los iones Al^{3+} solvatados pueden hidrolizarse según la reacción simplificada:



En los ensayos realizados, se pudo observar que el pH tiene un efecto significativo en la transformación adicional de la especiación del ACH que se puede explicar de la siguiente manera:

Cuando el pH baja de 5, el aluminio actúa como catión Al^{3+} , o correctamente como $Al(H_2O)_6^{3+}$, ya que a causa de su radio iónico y de su carga, el Al (III) solvata moléculas de agua fuertemente, formando un octaedro. Como el agua es un dipolo, los hidrógenos (cargados positivamente) se orientan hacia afuera y los oxígenos (cargados negativamente) se orientan hacia el aluminio (Aguirre-Gómez, 2001). La pérdida del protón del agua es facilitada por la carga positiva del catión metálico. Cuando el pH del medio se empieza a elevar por encima de 5, el aluminio hidroliza moléculas de agua adyacentes. El grado de hidrólisis se incrementa a la vez que se incrementa el pH resultando en una serie de complejos de Al-OH. Por lo tanto, el pH del medio es el que determina la solubilidad o insolubilidad del aluminio y las distintas especies iónicas predominantes. La pérdida de H^+ a su vez, permite al grupo OH^- acercarse más al aluminio que a las moléculas de agua adyacentes.

Estudios recientes han demostrado que las especies de Al_a (especies monoméricas) se forman a pH más ácidos, por tanto de la figura 11 se puede atribuir que para los ensayos de jarras 1 y 2 posiblemente se formaron en mayor proporción estas especies; además se ha demostrado que las especies de Al_a disminuyen rápidamente a medida que el pH se eleva, y llega a un mínimo en el pH aproximadamente 6,0. En contraste, un rápido aumento de las especies Al_b muy seguramente se pudieron haber formado en la región de pH entre 6,0 – 6,7 correspondiente a la mejor dosis de bicarbonato de las cinco concentraciones evaluadas (15 ppm) para las cuatro composiciones de mezclas de agua. Por tanto, según los resultados obtenidos, se puede inferir que el máximo de especies Al_b se produjo a un pH casi neutro, cercano a 6,5 produciendo una rápida disminución de especies Al_a a valores de pH superiores.

Los resultados mostrados por Wang *et al.* (2004) y Yan *et al.*, (2008) indican que la fracción Al_a en los coagulantes primarios es la especie más inestable. Después de la dosificación, estas especies serían transformadas rápidamente en Al_b, y finalmente en Al_c dependiendo de las condiciones de reacción. La especies poliméricas y coloidales, una vez son preformadas, son bastante estables. La magnitud del cambio de las especies de Al_a a Al_b hasta Al_c disminuye en gran medida con el aumento de la relación molar OH/Al cómo se explica más adelante.

6.3 Influencia del pH sobre la eficiencia de remoción de color

El color en el agua cruda para las cuatro composiciones según los muestreos realizados se indica a continuación.

Tabla 19. Color aparente del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.

Composición	Muestreo						Promedio UPC
	1	2	3	4	5	6	
1	66	55	62	78	77	46	64
2	83	74	79	88	85	68	80
3	103	95	96	101	87	76	93
4	120	115	114	113	90	94	108

El pH óptimo de coagulación está directamente relacionado con la eficiencia de la remoción de color, que se puede atribuir a la mayor formación de especies Al_b, responsables de la eliminación de color. Para todas las composiciones de mezclas de agua, el pH óptimo de coagulación estuvo en el intervalo de 6,0 y 6,70 tal como se había mencionado anteriormente.

Estudios han confirmado que el contenido del preformado Al_b en los coagulantes poliméricos se correlaciona bien al Al_{13} , que en su gran mayoría es el responsable en la eliminación de MON. Bottero y Fiessinger afirman que la proporción en la formación de monómeros, Al_{13} y $Al(OH)_{3(s)}$ dependen de la basicidad o relación molar $r = [OH^-]/[Al^{3+}]$ del coagulante polimérico, y cuando esta se encuentra en un intervalo de 2,0-2,5 la distribución de las especies Al_b se encuentran en mayor proporción. En el caso del ACH utilizado en el laboratorio, la relación molar OH/Al fue de 2,16 correspondiente a una basicidad igual a 72% y un porcentaje de Al_2O_3 igual a 20% como se indica en la tabla 13.

En la figura 12 se observa que para el ensayo de jarra 1 de todas las composiciones, correspondiente a la “jarra de control” la cual no se alcalinizó, el porcentaje de remoción de color aparente no fue eficiente y que a medida que se dosificó con bicarbonato de sodio el porcentaje de remoción de color aparente aumentó. Se encontró que la mejor dosis de bicarbonato de sodio de las cinco concentraciones evaluadas fue la de 15 ppm debido a que a esta concentración se obtuvo mayor porcentaje de eliminación de color aparente, en los procesos de coagulación/floculación.

Tabla 20. Pruebas de múltiples rangos para el mayor porcentaje de remoción de color aparente por dosis de alcalinizante de cada una de las composiciones.

Método: 95,0 porcentaje LSD				
Dosis de alcalinizante ppm	Casos	Media LS	Sigma LS	Composición
15	12	85,12	1,15	1
15	12	85,16	0,83	2
15	12	87,06	0,88	3
*15	12	89,80	0,92	4
*25	12	90,64	0,92	4

* indica que no hay diferencias significativas

En la figura 12 indica la variación del color aparente después del proceso de coagulación con ACH a las diferentes dosis de alcalinizante evaluadas.

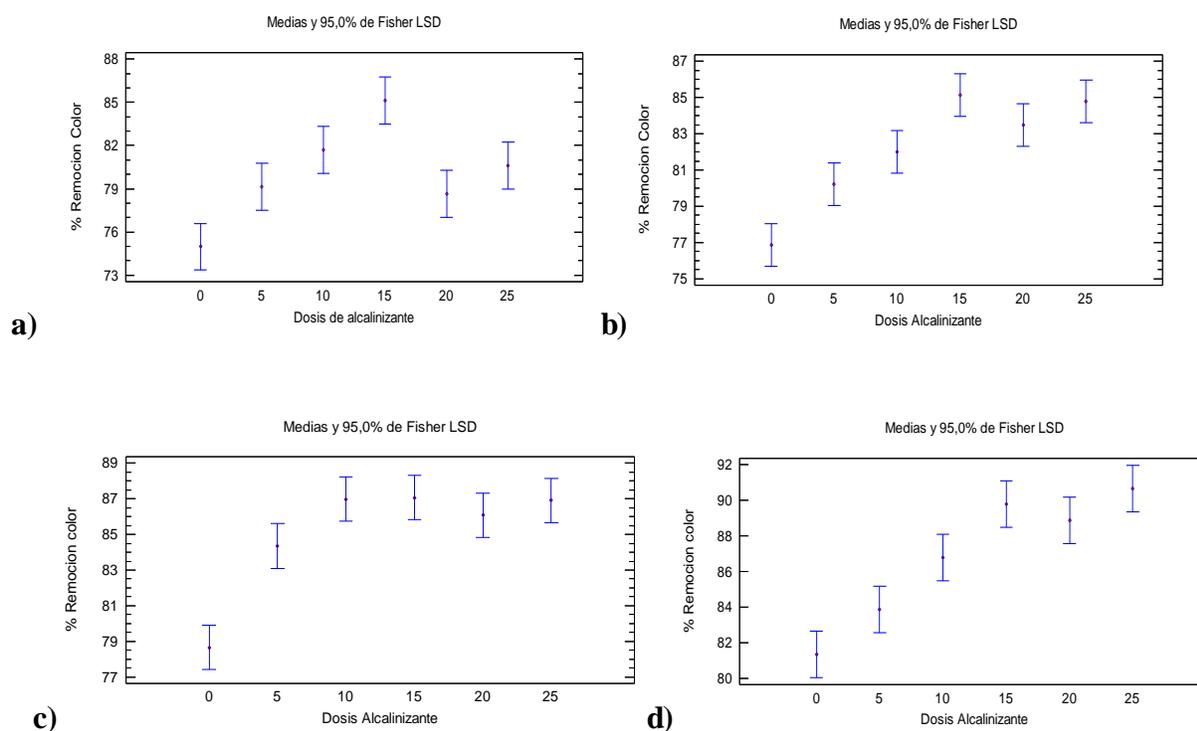


Figura 12. Medias de la dosis de alcalinizante sobre el porcentaje de remoción de color de cada una de las composiciones. a) Composición 1; b) Composición 2; c) Composición 3 y d) Composición 4.

6.4 Interacción de las especies de Al con ácidos húmicos

Debido a que se encontró que la concentración de COT en las aguas crudas de la quebrada Las Piedras es de 1,50 ppm y la de COD es de 0,55 ppm, se puede atribuir que el color en las aguas del

embalse Río Bobo y de la quebrada Las Piedras se debe principalmente a la presencia de materia orgánica natural, en particular materia húmica soluble que consiste en ácidos húmicos y fúlvicos.

Se ha demostrado que las sustancias húmicas adsorben sobre el óxido de Al parcialmente soluble. En particular, los ácidos húmicos interactúan con los iones de Al, debido a que los grupos funcionales carboxílicos en los ácidos húmicos pueden disociar el enlace de los iones de hidrógeno con los iones de Al. Además, la materia orgánica asociada con cationes di - y trivalentes del metal pueden actuar como estabilizadores para los agregados (Elfarissi, *et al* 1998).

En la figura 11 se observa que cuando hubo una disminución en el pH, debido al consumo dramático de iones OH^- resultantes de la hidrólisis con Al, no hubo interacción entre sustancias húmicas y Al debido a que la remoción de color aparente no fue eficiente. A medida que el pH aumentó, las especies poliméricas de aluminio catiónico y las sustancias húmicas posiblemente interactuaron con los compuestos de aluminio con carga positiva para formar precipitados de complejos pesados formados por ácidos húmicos y fúlvicos, y de aluminio; esto fue debido a que se observó mayor porcentaje de eliminación de color aparente.

Estudios realizados en cuanto a la relación Al/MON indican que la formación de complejos entre Al polimérico y ácido húmico se produce a un pH casi neutro, en parte según la abundancia de Al polimérico, que en el caso del coagulante utilizado en el laboratorio tenía una concentración de Al de 5,30 M. Con base a la literatura puede sugerirse que los coagulantes de aluminio y los ácidos húmicos pueden inducir las dos respuestas siguientes durante el proceso de coagulación (Xiaoxiao Zhang *et al.*, 2012):

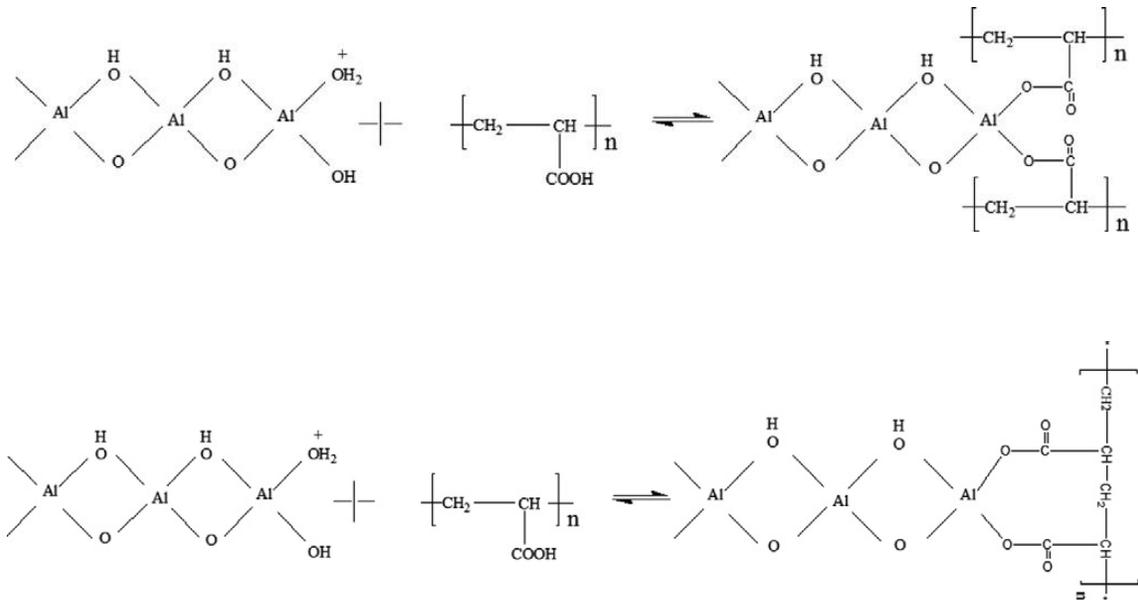


Figura 13. Interacción entre especies poliméricas de Al con los ácidos húmicos.

6.5 Mecanismos de eliminación de la MON

Varios mecanismos se refieren a la hora de describir la eliminación de la MON, y cada mecanismo se ve favorecido por un conjunto particular de condiciones operativas. En la práctica, es probable que más de un mecanismo sea el responsable de la eliminación de la MON.

Las condiciones operativas para los mecanismos de neutralización de la carga y adsorción por atrapamiento no son los mismos. Por lo tanto, es poco probable que la eliminación de turbiedad, de MON coloidal y de la MON soluble sean operados simultáneamente durante el tratamiento. Es posible, sin embargo, controlar el proceso de coagulación para permitir interacciones secuenciales de coagulante con la MON y la turbiedad para efectuar su eliminación durante la coagulación/floculación.

A un pH muy bajo, muy pocas moléculas MON se pueden acomodar alrededor de cada ion de aluminio porque la MON contiene pocos sitios aniónicos por debajo de pH 2, y la MON se encuentra estable. Esto pudo haber ocurrido en el tratamiento 1 de todas las composiciones, la cual no se alcalinizó, debido a que se observó la formación de un floc muy pequeño y disperso que resultó en una disminución de la eficiencia del proceso de coagulación.

A medida que se elevó el pH al dosificar con bicarbonato de sodio a diferentes concentraciones, lo que pudo ocurrir fue lo siguiente:

La obtención de más sitios aniónicos que se generan por desprotonación de los grupos carboxilo, que al mismo tiempo, las moléculas se desenrollan y se vuelven más lineales, siendo esto, el resultado de la repulsión de las muchas cargas negativas; y en lugar de requerir más coagulantes catiónicos para neutralizar el aumento de la carga aniónica (como sería requerido para un mecanismo por neutralización de cargas electrostáticas), la MON se enlazan varias veces al mismo ion aluminio, y también se puede unir a otros iones de aluminio. De esta manera, las moléculas orgánicas están unidas entre sí a través de puentes de aluminio para formar complejos grandes, a menudo insolubles. Por este mecanismo, la precipitación se producirá debido al gran tamaño del floc, tal como se observa en la siguiente figura (Chowdhury, 1991):

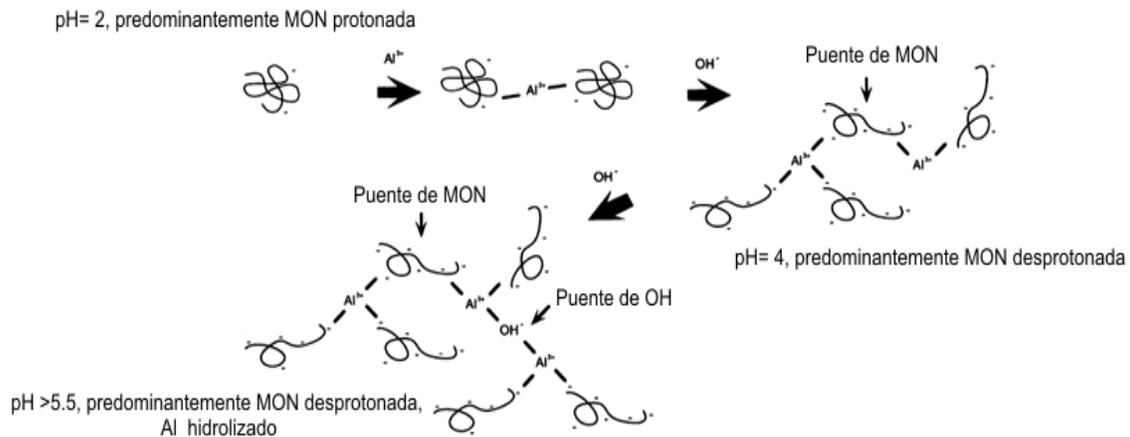


Figura 14. Modos de puente entre los iones de MON y de aluminio

A medida que el pH se eleva aún más (tal como ocurrió en los ensayos de jarras 3 y 4 con mayores concentraciones de bicarbonato), posiblemente se producirá la hidrólisis de aluminio complejado con dos iones de MON que no están unidos con exceso de aluminio. La hidrólisis del aluminio complejado conduce a la formación de complejos mixtos donantes (MON grupos carboxilo e iones hidróxido), donde los iones de hidróxido pueden promover puentes y resultar en la precipitación adicional. Para aguas con baja alcalinidad como es el caso de las aguas de la quebrada Las Piedras, la hidrólisis de aluminio baja el pH lo suficiente para formar algunos complejos de MON-aluminio soluble, que fue lo que posiblemente ocurrió en el ensayo 1, la cual no se alcalinizó.

Para otras aguas con capacidad de amortiguación más altas (como en los ensayos de jarras 5 y 6 con adición de dosis de bicarbonato más altas), el pH después de la adición de coagulante no disminuye bruscamente ($\text{pH} < 5$) para permitir que cualquier complejante de MON-aluminio soluble se produzca, y la MON soluble es removida solamente por adsorción en los productos de hidrólisis de aluminio precipitados.

Para resumir los resultados obtenidos y de otros investigadores (Hundt y O'Melia, 1988; Randtke, 1988; Van Benschoten y Edzwald, 1990b; Gregor et al., 1997; Edzwald y Tobaison, 1999), el modelo de coagulación para la eliminación de la MON con coagulantes polimerizados podría ser traducido como se indica en la figura 15. Once estados típicos de floculos se forman como resultado del proceso físico químico después de la adición de coagulante.

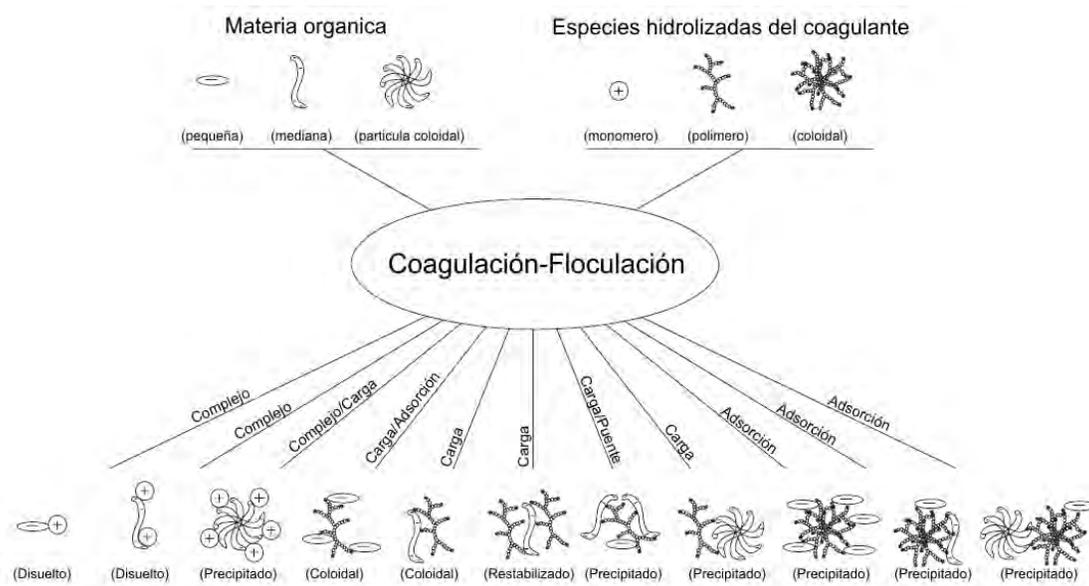


Figura 15. Modelo de la interacción de las especies hidrolizadas del coagulante y materias orgánicas.

El mecanismo de eliminación de contaminantes se rige por el tamaño de las partículas de las especies coagulantes. Estudios han demostrado que la mayoría de los floculos formados por Al_a son pequeños y difíciles de tratar. Al_b desestabiliza la MON de manera eficiente, pero algunos floculos preformados de Al_b no son tan grandes como los formados por especies de Al coloidales o sólidos (Al_c), por tanto no se sedimentan de manera eficiente.

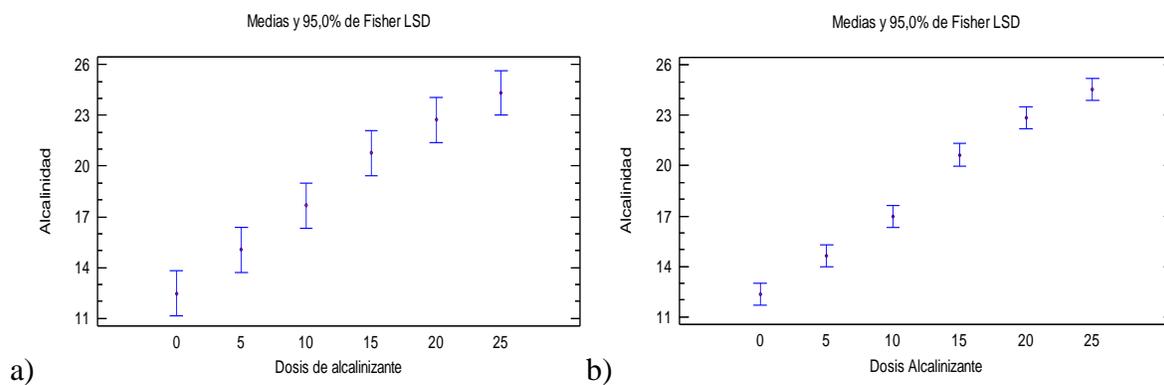
6.6 Influencia de la alcalinidad sobre el proceso de coagulación

Teniendo en cuenta la tabla 21 y la figura 16, se puede establecer que a 15 ppm, la alcalinidad final (después del proceso de coagulación) para las cuatro composiciones se encuentra en un promedio de 20,2 mg/L CaCO_3 .

Tabla 21. Pruebas de múltiples rangos para la alcalinidad de la dosis de alcalinizante de 15 ppm de cada una de las composiciones.

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Casos	Media LS	Sigma LS	Composición
12	20,77	0,93	1
12	20,65	0,46	2
12	19,55	0,38	3
12	19,73	0,25	4

En la figura 16 indica la variación de la alcalinidad final después del proceso de coagulación con ACH a las diferentes dosis de alcalinizante evaluadas.



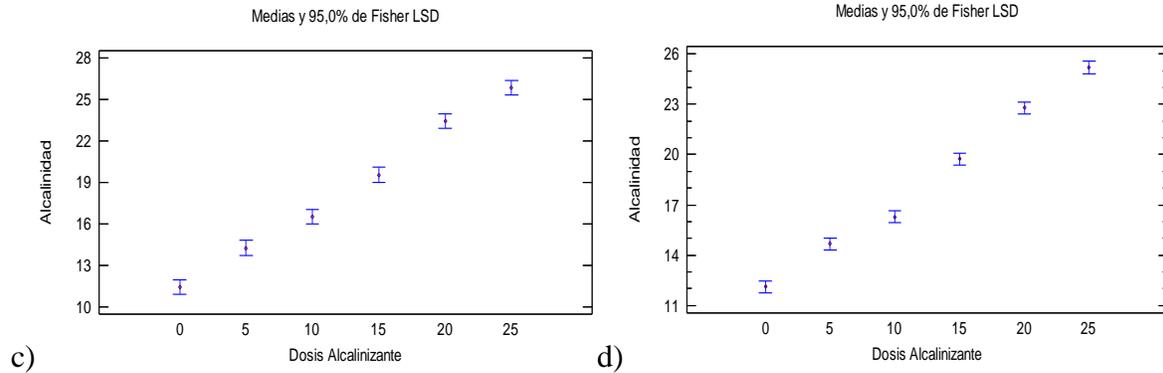


Figura 16. Medias de la dosis de alcalinizante sobre la alcalinidad final para cada una de las composiciones. a) Composición 1; b) Composición 2; c) Composición 3 y d) Composición 4.

En la figura 11 se indica el cambio de pH de la solución después de la coagulación con ACH, que en parte también se debe a que los coagulantes metálicos son ácidos y por tanto pueden consumir grandes cantidades de alcalinidad del agua cruda, que en gran manera depende del tipo coagulante utilizado. Alcalinidad más alta significa más OH^- proporcionados para satisfacer el consumo de hidrólisis del coagulante; y el pH de la solución es entonces más estable con la adición del coagulante.

El consumo de la alcalinidad también está relacionado con la basicidad del coagulante. Los coagulantes con valores de B más altos consumen relativamente menos alcalinidad que aquellos con una B baja y media; siendo en este estudio una ventaja, puesto que el valor de B del ACH usado en el laboratorio fue alto, por tanto esto ayudó en la eficiencia del proceso de coagulación, debido a que el agua de la quebrada Las Piedras, que será la principal fuente de abastecimiento, presenta en la mayoría del tiempo baja alcalinidad.

El pH y la alcalinidad inciden en el rendimiento del coagulante de manera significativa debido a que afectan la distribución de la especiación del coagulante después de la dosificación. La alcalinidad en el agua cruda para las cuatro composiciones según los muestreos realizados se indica a continuación.

Tabla 22. Alcalinidad del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.

Composición	Muestreo						Promedio ppm CaCO ₃
	1	2	3	4	5	6	
1	18,7	17,2	17,9	13,3	28,5	15,2	18,5
2	14,5	15,6	17,5	13,8	25,5	14,4	17,8
3	16,9	16,2	16,6	14,5	24,3	15,3	17,5
4	15,2	15,3	15,6	15,3	21,3	20,1	14,1

Para conocer la concentración de CaCO₃ en ppm necesarios para satisfacer el consumo de hidrólisis del coagulante en cada uno de los ensayos de jarras para las cuatro composiciones de mezclas de agua, se midió la alcalinidad en cada ensayo después de adicionar las diferentes concentraciones de bicarbonato de sodio. Los resultados obtenidos se indican a continuación:

Tabla 23. Prueba de múltiples rangos para la alcalinidad (sin agregar el ACH) por dosis de alcalinizante de todas las composiciones.

No. Ensayo de jarras	Dosis Alcalinizante ppm	Media C*1 ppm	Media C*2 ppm	Media C*3 ppm	Media C*4 ppm
1	0	18,50	17,80	17,50	14,10
2	5	23,12	22,43	22,15	18,74
3	10	26,56	25,82	25,57	22,18
4	15	28,05	27,34	27,06	23,65
5	20	32,26	31,57	31,25	27,81
6	25	34,91	34,22	33,87	30,50

C*: Composición

A continuación se indican los resultados de la alcalinidad después de haber completado todo el proceso del ensayo de prueba de jarras.

Tabla 24. Prueba de múltiples rangos para la alcalinidad final por dosis de alcalinizante de todas las composiciones.

Método: 95,0 porcentaje LSD

No. Ensayo de jarras	Dosis Alcalinizante ppm	Media C*1 ppm	Media C*2 ppm	Media C*3 ppm	Media C*4 ppm
1	0	12,48	12,36	11,42	12,12
2	5	15,06	14,64	14,25	14,56
3	10	17,66	16,97	16,53	16,29
4	15	20,77	20,65	19,55	19,73
5	20	22,72	22,23	23,43	22,74
6	25	24,33	24,52	25,87	25,2

C*: Composición;

En la figura 16 y en la tabla 24 se observa que la alcalinidad aumentó progresivamente a medida que se agregaron mayores concentraciones de bicarbonato de sodio. La siguiente tabla indica el consumo de alcalinidad que presentó cada ensayo de jarras en las cuatro composiciones de mezclas de agua.

Tabla 25. Consumo de alcalinidad que presentó cada tratamiento en las cuatro composiciones.

No. Ensayo de jarras	Dosis Alcalinizante ppm	Consumo de alcalinidad C*1	de alcalinidad C*2	en ppm de CaCO₃ C*3	C*4
1	0	6,02	5,44	6,08	1,98
2	5	8,06	7,79	7,90	4,18

3	10	8,90	8,85	9,04	5,89
4	15	7,28	6,69	7,51	3,92
5	20	9,54	9,34	7,82	5,07
6	25	10,58	9,70	8,00	5,30

C*: Composición

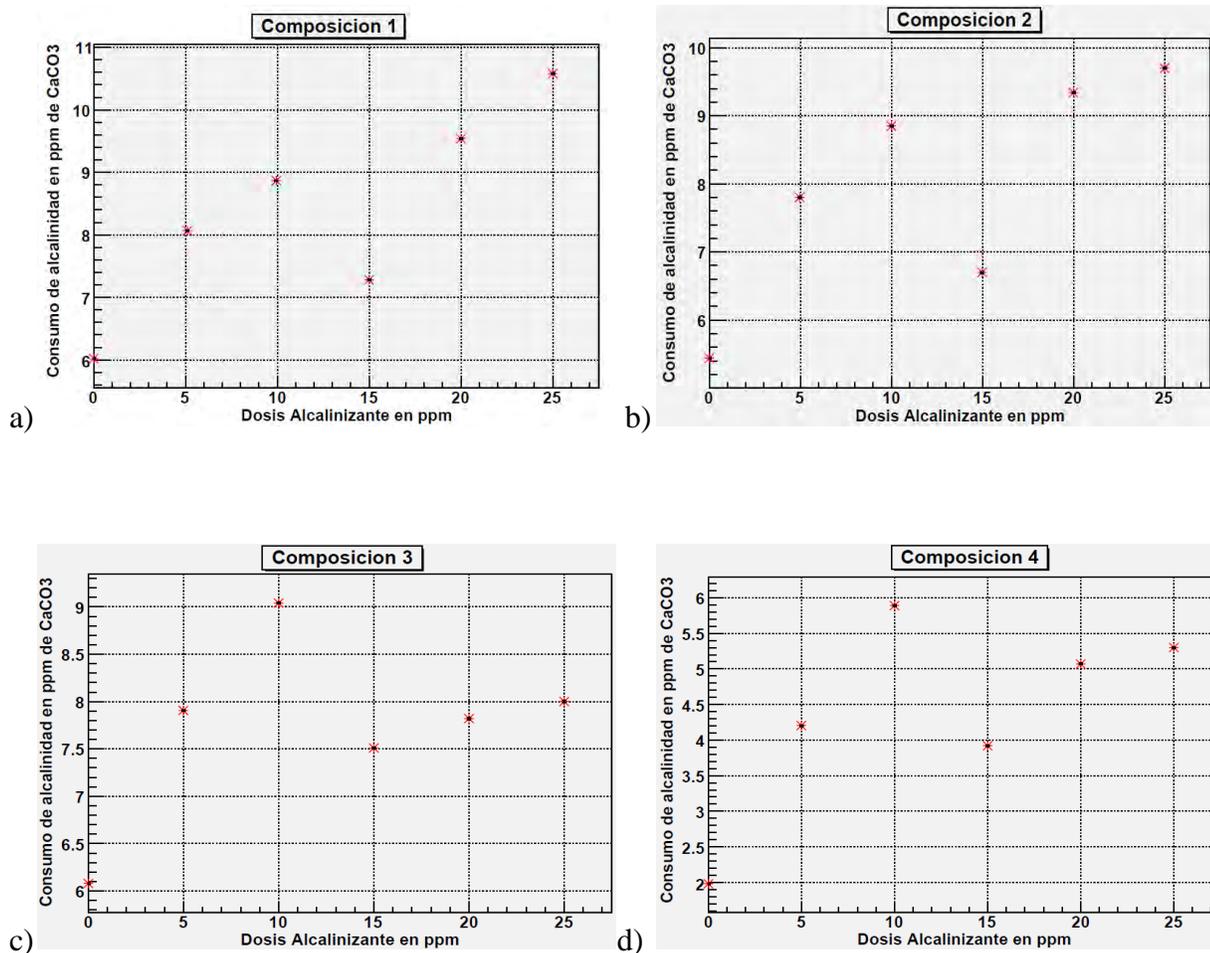
Para el ensayo 1 de las cuatro composiciones con una concentración de 0 ppm de bicarbonato, se encontró que la alcalinidad presente no proporcionó suficientes grupos OH^- para satisfacer el consumo por la hidrólisis del coagulante, además el pH de la solución fue inestable con la adición del coagulante, bajando hasta un intervalo de pH entre 4,25 - 4,40. Con lo anterior se puede atribuir que las especies dominantes en estos ensayos de jarras fueron de tipo Al_a debido a que éstas se forma a pH bajos, ya que el proceso de coagulación/floculación en estos tratamientos no fue eficiente.

En el ensayo 2 de las cuatro composiciones de mezclas de agua con una concentración de 5 ppm se observó que también la alcalinidad presente no proporcionó suficientes grupos OH^- para satisfacer el consumo por la hidrólisis del coagulante, lo cual ocasionó un descenso en el pH, alcanzando el intervalo de pH ácido entre 4,80 – 5,50. En los ensayos de jarras 3 y 4 se observó que mediante la adición del álcali se produjo una alta eficiencia de las especies de Al formadas que fueron bastante estables y muy eficientes en la eliminación de partículas coloidales.

Además se encontró, que para el ensayo 4 de todas las composiciones con una concentración de alcalinizante de 15 ppm, dichas especies hidrolizadas a un pH cercano a 6,7 necesitaron menos alcalinidad para su formación debido a que hubo poco consumo de alcalinidad tal como se indica en la figura 17. Según lo anterior se puede atribuir que las especies formadas en estos ensayos de jarras

podieron ser de tipo A_b preformadas, puesto que estas presentan una alta estabilidad cuando se dosifica en el agua bajo ciertas condiciones de pH, que en el caso de este estudio fue cercano a 7,0.

Figura 17. Consumo de alcalinidad que presentó cada jarra en las cuatro composiciones.



Finalmente para los ensayos de jarras 5 y 6 las aguas tenían una alcalinidad alta y por tanto el pH después de la coagulación presentó valores por encima de 7,0. En los ensayos 5 y 6 de las pruebas de jarras realizadas en el laboratorio se observó que cuanto mayor fue la alcalinidad del agua, aumentó el proceso de hidrólisis puesto que los flocs se formaron rápidamente, hubo formación de polímeros

más grandes de hidróxido metálico, y aumentaron la precipitación de los flocs. Sin embargo, estas condiciones no favorecieron necesariamente la eliminación MON máxima (ver tabla 18).

La reacción entre el aluminio hidrolizado de aluminio bajo condiciones de alcalinidad se indica a continuación:



El compuesto que se produce es muy inestable y al hidrolizarse nuevamente forma complejos polinucleares insolubles de Al que precipitan tales como $(\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+})$, $(\text{Al}_3(\text{OH})_4^{5+})$, $(\text{Al}_{13})_4(\text{OH})_{24}^+$, etc.; responsables de la eliminación de MON soluble.

6.7 Remoción de turbiedad con ACH

El mayor problema que enfrenta el agua de Las Piedras es la eliminación de la MON soluble con valores bajos de turbiedad, que incapacita la producción de un floculo aceptable; es por ello que fue importante proporcionar sitios de nucleación disponibles dosificando el agua con bicarbonato de sodio que actuó como un coadyuvante de la coagulación, evitando así, la necesidad de introducir productos químicos y etapas de tratamiento adicionales.

Cabe resaltar que la turbiedad natural proporciona una fuente disponible de los sitios de desarrollo temprano de nucleación, y una vez presente, estos floculos actúan como sitios de adsorción para MON soluble.

La turbiedad en el agua cruda para las cuatro composiciones de mezclas de agua según los muestreos realizados se indica a continuación.

Tabla 26. Turbiedad del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.

Composición	Muestreo						Promedio NTU
	1	2	3	4	5	6	
1	2,35	2,35	2,28	2,10	2,97	2,25	2,38
2	4,21	3,80	3,69	3,36	3,67	2,84	3,60
3	5,42	5,14	4,98	4,78	4,31	3,67	4,72
4	7,13	6,54	5,91	5,98	4,61	4,22	5,73

En la tabla 26 se observa que a medida que aumenta el porcentaje de volumen del agua de Río Bobo (ver tabla 6), se incrementa la turbiedad, puesto que estas aguas presentan en la mayoría del tiempo valores de turbiedad más altos que el agua de la quebrada Las Piedras; sin embargo es importante tener en cuenta que según los muestreos realizados, en promedio la turbiedad en el agua cruda de cada composición fue baja.

Con base a la tabla 27 y la figura 18, se puede afirmar que aunque la concentración de 15 ppm no fue la mejor dosis de las 5 evaluadas, esta concentración mostró un buen promedio en la eficiencia de remoción de turbiedad con porcentajes de remoción de 62,93, 68,20, 81,97 y 83,01 para las composiciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente; encontrándose entre los valores permitidos según la resolución 2115 del 2007.

Tabla 27. Pruebas de múltiples rangos para el mayor porcentaje de remoción turbiedad por dosis de alcalinizante de cada una de las composiciones.

Método: 95,0 porcentaje LSD				
Dosis de alcalinizante	Casos	Media LS	Sigma LS	Composición
5	12	64,48	2,27	1
20	12	70,47	1,28	2
15	12	81,97	1,67	3
25	12	84,72	1,24	4

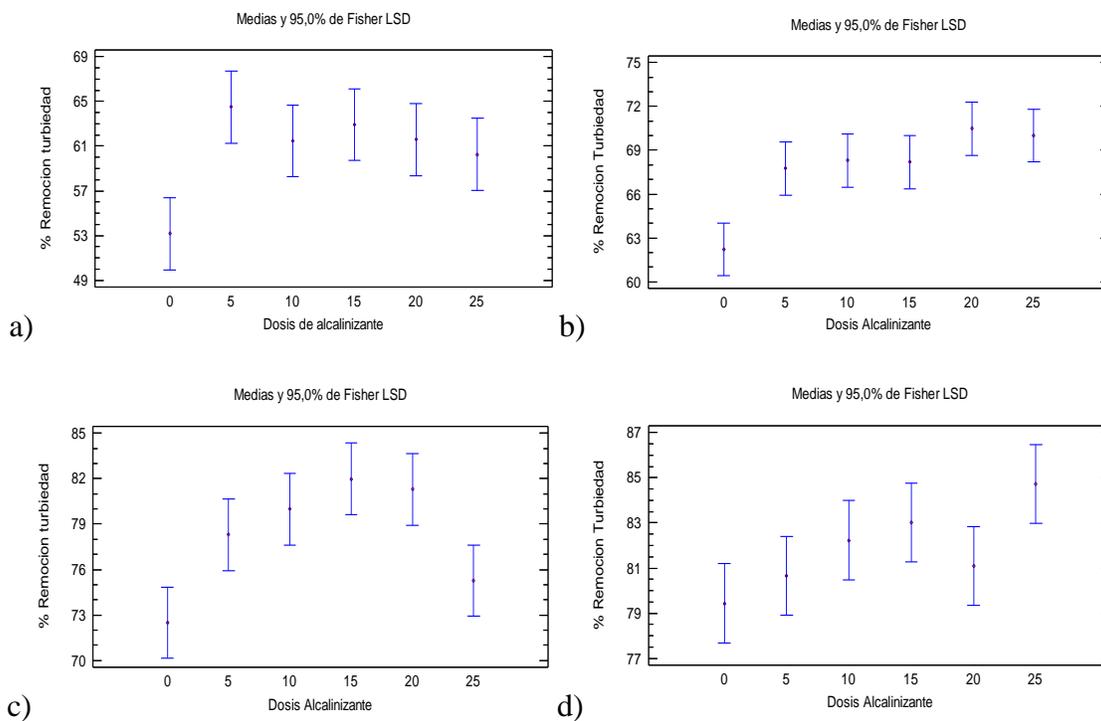


Figura 18. Medias de la dosis de alcalinizante sobre el porcentaje de remoción de turbiedad de cada una de las composiciones de mezclas de agua. a) Composición 1; b) Composición 2; c) Composición 3 y d) Composición 4.

Debido a que el valor de la basicidad del coagulante fue alto, se infiere que a pH cercano a 7,0 la mayoría del Al (III) hidrolizado se encontró en forma de Al_b preformado, por tanto pudo

desestabilizar de manera eficiente las partículas para formar agregados y así remover el color aparente y la turbiedad presente en el agua. Sin embargo, no se observó la formación de floculos lo suficientemente grandes para sedimentar de manera eficiente, y por tal motivo permaneció principalmente en forma coloidal.

6.8 Efecto de la conductividad

La medida de la conductividad es una buena forma de control de calidad del agua, siempre que no se trate de contaminación orgánica por sustancias no ionizables y la composición del agua se mantenga relativamente constante. En las fuentes analizadas, la conductividad en el agua cruda para las cuatro composiciones según los muestreos realizados se indica a continuación.

Tabla 28. Conductividad del agua cruda que se obtuvo en cada uno de los muestreos.

Composición	Muestreo						Promedio $\mu\text{S/cm}$
	1	2	3	4	5	6	
1	37,8	38,3	35,3	28,4	61,5	30,5	38,53
2	38,7	39,2	37,1	32,3	58,5	32,6	39,73
3	39,6	39,5	38,6	35,2	54,2	34,6	40,28
4	40,4	40,2	40,2	38,4	50,2	47,8	41,0

En el grafico 19 se observa que la conductividad aumentó progresivamente a medida en que se agregó mayores concentraciones de bicarbonato de sodio esto es debido a que incrementó la concentración de sólidos totales disueltos en el agua (STD); además, se puede establecer que a 15 ppm, la conductividad para las cuatro composiciones se encuentra en un promedio de 64,93 $\mu\text{S/cm}$, esto

indica que las fuentes hídricas de estudio son aguas muy blandas aun cuando se incrementa los STD dosificándolas con bicarbonato de sodio.

Tabla 29. Pruebas de múltiple rangos para la conductividad de la dosis de alcalinizante de 15 ppm de cada una de las composiciones.

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Casos	Media LS	Sigma LS	Composición
12	64,43	1,68	1
12	66,62	0,94	2
12	64,85	0,51	3
12	63,81	0,34	4

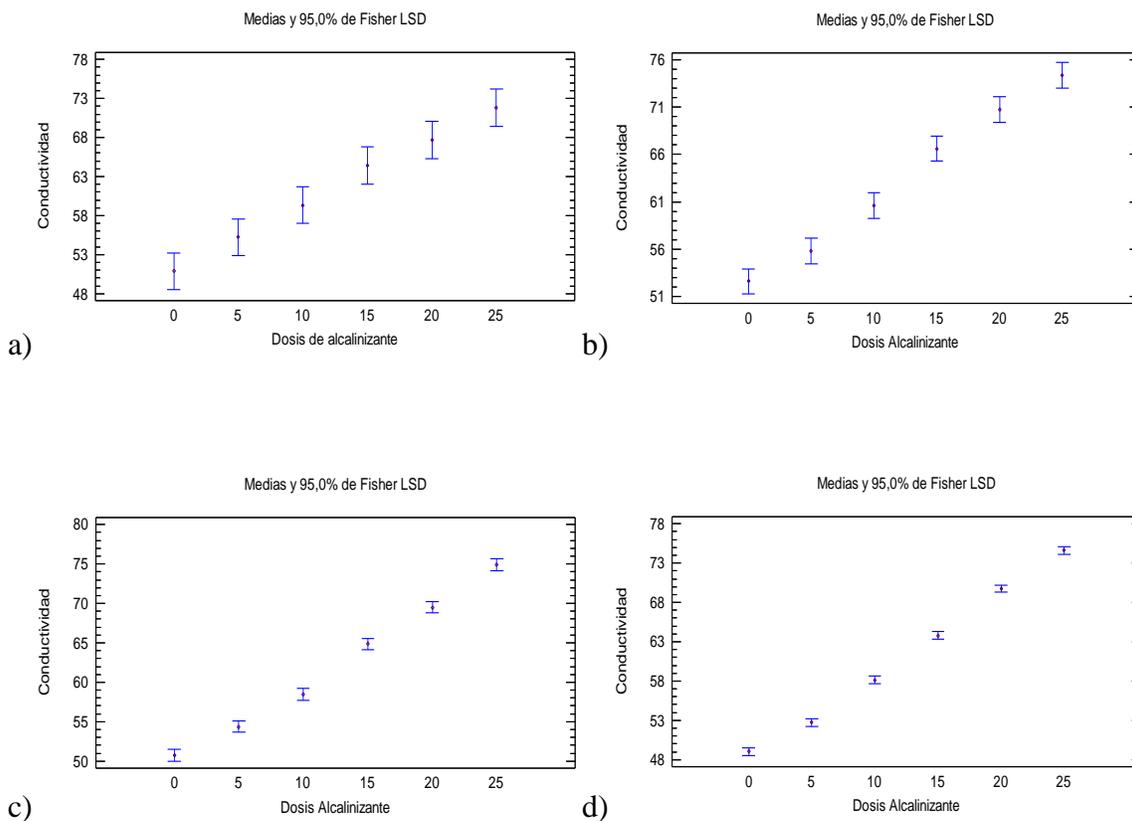


Figura 19. Medias de la dosis de alcalinizante sobre la conductividad para cada una de las composiciones. a) Composición 1; b) Composición 2; c) Composición 3 y d) Composición 4.

7 CONCLUSIONES

- La alcalinización con bicarbonato de sodio consiguió mejorar el rendimiento del proceso de coagulación/floculación con ACH y por ende eliminar la MON soluble, el color aparente y la turbiedad presentes en las fuentes de agua estudiadas.
- La regulación del pH en el proceso de coagulación es uno de los factores más importantes que rigen la eliminación de la MON soluble presente en el agua. En este trabajo el pH fue regulado con la adición de bicarbonato de sodio que proporcionó la alcalinidad necesaria para satisfacer la demanda de hidrólisis del coagulante y la formación de especies de aluminio responsables de la eliminación de la MON soluble.
- El pH y la alcalinidad inciden en el rendimiento del coagulante de manera significativa que se podría atribuir a la afectación de la distribución de la especiación del coagulante después de la dosificación.
- La basicidad del coagulante utilizado ($r=[OH^-]/[Al^{3+}]$), promueve la formación de las especies de aluminio más eficientes para tratar aguas con altas concentraciones de MON soluble y adicionalmente consume relativamente menos alcalinidad debido a su alta basicidad.
- La correlación entre el efecto del factor dosis de alcalinizante bicarbonato de sodio y la covariable dosis de coagulante hidroxiclورو de aluminio no es estadísticamente significativa sobre la eficiencia del proceso de coagulación/ floculación.

- La conductividad del agua aumentó progresivamente a medida que se agregaron mayores cantidades de bicarbonato de sodio, esto es debido a que existe una relación directa con el incremento de la concentración de los iones disueltos en el agua.

8 BIBLIOGRAFÍA

Aguirre-Gómez, R. (2001). Química de los suelos ácidos, templados y tropicales. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, México. pp. 1-4

Akitt J.W., Farthing A., (1981) Aluminum-27 nuclear magnetic resonance studies of the hydrolysis of aluminum (III). IV. Hydrolysis using sodium carbonate, J. Chem. Soc., Dalton Trans. p.1617.

Akitt, J.W., Farthing, A., 1981. Aluminum-27NMR studies of the hydrolysisaluminum (III). Chem. Soc. Dalton Trans. 1981;, p. 1606–1626.

Akitt J.W., Greenwood N. N., Khandelwal B.L., Lester G.D., J. Chem. Soc. Dalton Trans., 1972. p. 604-610.

Amirtharajah, A. Initial mixing. En *Coagulation and Filtration: Back to the Basics*. AWWA Seminar proceedings, American Water Works Association, Denver, 1981. p. 3

Amirtharajah, A. The mechanisms of coagulation. Seminario Nacional sobre Coagulación y Filtración Directa. Universidad de São Paulo, Escuela de Ingeniería de San Carlos, 1989. p.3-4

Approvedby Estándar Methods Committee, 2001.Joint Task Group: 21st Edition-James K. Edzwald (chair), Penny. Editorial revisions, 2011.

APHA-AWWA-WEF (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. Washington DC, 2001. 2-1 a 2-3, método 2120 B.

Arboleda Valencia, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tercera Edición. Santa fe de Bogotá. ACODAL 1992. 362p.

Aveston J., Hydrolysis of aluminum ion: ultracentrifugation and acidity measurements, J. Chem. Soc. (1965) 4438.

Baes C.F., Mesmer R.E., The Hydrolysis of Cations, Wiley, NY, 1976. p. 3-5

Bertsch P.M., in: G. Sposito (Ed.), The Environmental Chemistry of Aluminum, CRC Press, Boca Raton, FL, 1989, p. 87.

Black, A. P., Christman, R. F. Characteristics of colored surface waters. Journal of the American Water Works Association, 55(6), 1963, pp. 753-770.

Black, A. P.; Singley, J. E.; Whittle, G. P.; Maulding, J. S. Stoichiometry of the coagulation of color causing organic compounds with ferric sulfate. Journal of the American Water Works Association, 55(10), pp.1347, 1963.

Bottero J.Y., Axelos M., Tchoubar D., J.M., Cases J.J. Fripiat, F. Fiessinger, Mechanism of formation of aluminum trihydroxide from Keggin Al₁₃ polymers, J. Colloid Interface Sci. 117 (1987) 47.

Bottero, J.Y., Cases, J.M., Fiessinger, F., Poirier, J.E., 1980. Studies of hydrolyzed aluminum chloride solutions. I. Nature of aluminum species and composition of aqueous solutions. J. Phys. Chem. 84, 2933e2939.

Bochkarev, G.R., Kurbatov, P.V. and kondrat'ev, S.A. Intensification of coagulation purification of highly colored waters. Journal of Mining Science, 39 (1), 94101, 2003.

Bottero, J.Y.; Fiessinger, F. Nordic Pulp and Paper Res.J., n. 2, p. 81, 1989.

Bradley S.M., Kydd R.A., Yamdagni R., Comparison of the hydrolysis of gallium(III) and aluminum(III) solutions by nuclear magnetic resonance spectroscopy, J. Chem. Soc., Dalton Trans. (1990) 2653.

Buchanan W., Roddick F., Porter N., Drikas M., Fractionation of UV and VUV pretreated natural organic matter from drinking water. Environ. Sci. Technol. 39 (2005) 4647-4654.

Calculadora de Grandària Mostral GRANMO. www.imim.es/ofertadeserveis/software-public/granmo.

Canepa de Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Lima: CEPIS/OPS. p. 146

Centro de Control de Enfermedades CDC. 2006. Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories 5th Edition. [en línea]. Cuarta edición. http://www.cdc.gov/od/ohs/pdffiles/bmb4_spanish.pdf. [Consulta: 12 de septiembre de 2012].

CEPIS. Operación y mantenimiento de Plantas de Tratamiento de agua. Lima PERU. 2002. 855p.

Chowdhury Z. K., Amy G. L. and Bales R. C. (1991) Coagulation of submicron colloids in water treatment by incorporation into aluminium hydroxide flocs. *Environ. Sci. Technol.* 25, 1766-1773.

Christman, R. F., Ghassemi, M. The nature of organic color in water. Journal of the American Water Works Association, 58(6), 1966, pp. 623.

Cohen, J. M. & Hannah, S. A. Coagulation and flocculation. Capítulo 3 de *Water Quality and Treatment. A Handbook of Public Water Supplies*. Tercera edición, 1971.p.246

Decreto 1575, resolución 2115 de junio de 2007 por medio del cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, ministerio de protección social y ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. República de Colombia.

Di Bernardo, Luiz; Di Bernardo Dantas, Angela. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. Volumen 1. Segunda Edición. Rima (1 de janeiro de 2005). cap 14. p. 217

Dongsheng W., Wei S., Yi X., Hongxiao T., Gregory J. Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PAC1. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 243 (2004) 1–10.

Duan J.M., Gregory J., *Adv. Colloid Interface Sci.* 100–102 (2003) 475– 502.

Edzwald, J.K., Tobaison, J.E., 1999. Enhanced coagulation: us requirements and a broader view. *Water Sci. Technol.* 40 (9), 63–70.

Elfarissi F., Nabzar L., Ringenbach E., Pefferkorn E., Polyelectrolytic nature of humic substances-aluminium ion complexes interfacial characteristics and effects in colloid stability, *Colloids Surf. A* 131 (1998) 281–294.

Elfarissi F., Pefferkorn E., Kaolinite/humic acid interaction in the presence of aluminium ion, *Colloids Surf. A* 168 (2000) 1–12.

Exall K.N., van Loon G.W., Effects of raw water conditions on solute-state aluminium speciation during coagulant dilution, *Water Res.* 37 (2003) 3341–3350.

Galeano L.A., Guerrero M., Cerón L.C., Sánchez C.A. “Tratamiento de aguas superficiales de los ríos Pasto y Opongoy-Piedras mediante la tecnología PCFH para la eliminación de MON y parásitos indicadores de calidad (*giardia* spp y *cryptosporidium* spp).”. San Juan de Pasto. Colombia (2014) 8–6.

Gray K.A., The preparation, characterization and use of inorganic iron (III) polymers for coagulation in water treatment, doctoral dissertation, The Johns Hopkins University, Baltimore, MD, 1988. p. 3-5.

Gray K.A., Yao C.H., O’Melia C.R., *Am J. Water Wks Assn.* 87 (4) (1995) 136.

Gregor, J.E., Nokes, C.J., Fenton, E., 1997. Optimising natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminum coagulation. *Water Res.* 31 (12), 2949–2958.

Hilleboe, H.E.. *Manual de tratamiento de aguas*. México 1984. p. 134.

Hsu P.H., Aluminum hydroxides and oxyhydroxides, in: Dixon J.B., Weed S.W. (Eds.), *Minerals in Soil Environments*, Madison, WI, 1989, pp. 331–378.

Hsu, P.H., Cao, D., 1991. Effect of acidity and hydroxylamine on the determination of aluminum with ferron. *Soil Sci.* 152, 210–219.

Hu, C.Z., Liu, H.J., Qu, J.H., Wang, D.S., Ru, J., 2006. Coagulation behavior of aluminum salts in eutrophic water: significance of Al_{13} species and pH control. *Environ. Sci. Technol.* 40, 325e331.

Hundt, T.R., O'Melia, C.R., 1988. Aluminum–fulvic acid interactions: mechanisms and applications. *J. Am. Water Works Assoc.* 80 (4), 176–186.

Hutchinson, G.E., 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology.* 4, 15-427.

Jiang, J.Q., 2001. Development of coagulation theory and pre-polymerized coagulants for water treatment. *Sep. Purif. Methods* 30 (1), 127–141. Jiang, J.Q., Graham, N.J.D., 1998. Pre-polymerised inorganic coagulants

and phosphorus removal by coagulation—a review. *Water SA* 24 (3), 237–244.

John A. Arrington; Alvin Lieberman; Kemon J. Papacosta; Theodore S. Tanaka; Brannon H. Wilder. Approved by Estándar Methods Committee, 2001. Editorial revisions, 2011. Joint Task Group: 20th Edition-Raymond D. Letterman (chair). pp. 134-136.

Jr-Lin Lina , Ching-Ju M. Chinb , Chihpin Huang, Jill R. Panc , Dongsheng Wangd. Coagulation behavior of Al_{13} aggregates. *water research* 42 (2008) 4281–4290.

Korth A., Fiebiger C., Bornmann K., Schmidt W., NOM increase in drinking water reservoirs – relevance for drinking water production. *Water Sci. Technol.: Water Supply* 4 (2004) 55–60.

Letterman, R. D.; Vanderbrook, S. G. Effect of solution chemistry on coagulation with hydrolyzed $Al(III)$. Significance of sulfate ion and pH. *Water Research*, vol. 17, 1983, pp. 195-204.

Liu, H.J., Hu, C.Z., Zhao, H., Qu, J.H., 2009. Coagulation of humic acid by PACl with high content of Al_{13} : the role of aluminum speciation. *Sep. Purif. Technol.* 70 (2), 225e230.

Lu X.Q., Chen Z.L., Yang X.H., *Water Res.* 15 (1999) 3271–3280.

MacCarthy, P., and I.H. Suffet, 1989. "Introduction: Aquatic Humic Substances and Their Influence on the Fate and Treatment of Pollutants." in *Aquatic Humic Substances: Influence on Fate and Treatment of Pollutants*, I.H. Suffet and P. MacCarthy (eds.), American Chemical Society, Washington, DC, p. 4-5.

Matilainen A., Sillanpää M., Removal of natural organic matter from drinking water by advanced oxidation processes. *Chemosphere* 80 (2010) 351–365.

Matilainen A., Vepsäläinen M., Sillanpää M., Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Adv. Colloid Interf. Sci.* 159 (2010) 189–197.

Ministerio de la Protección Social. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución Número 2115 de junio 22 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano pp 1-32.

Montgomery, Douglas. *Diseño y análisis de experimentos*. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 2002. 915 p.

Peng, G., Hu, C.W., Chen, L.D., Wang, E.B., 2001. Synthesis of novel inorganic nanoclusters between kegginn-type cation $[AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(-H_2O)_{12}]^{7+}$ and heteropolyoxometalates. *Chem. J. Chin. Univ.* 22 (10),1629–1631 in Chinese.

Pernitsky, D.J. and Edzwald, J.K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 55 (2), 121– 141, 2006.

Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Manual III. Ciclo: Tratamiento*. Serie: Coagulación. CEPIS/OPS, 1992.

Randtke, S.J., 1988. Organic contaminant removal by coagulation and related process combinations. J. Am. Water Works Assoc. 80 (5), 40–56.

Shen, Y.H., Dempsey, B.A., 1998. Synthesis and speciation of polyaluminum chloride for water treatment. Environ. Int. 24 (8), 899e910.

Smith R.W., Reactions among equilibrium and nonequilibrium aqueous species of aluminum hydroxy complexes, Adv. Chem. Ser. 106 (1971) 250.

Sinha, S., Yoon, Y., Amy, G. and Yoon, J. Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes. Chemosphere, 57, 1115 – 1122, 2004.

Sistema Unico de Información de Servicios Públicos. Normatividad [en línea].
<<http://www.sui.gov.co/suibase/formatosEstratificacion/normatividad/Res.%202115%20de%202007.pdf>> [citado el 3 de febrero del 2015].

Steinberg, C., and U. Muenster, 1985. "Geochemistry and Ecological Role of Humic Substances in Lakewater." in: Humic Substances in Soil, Sediment, and Water: Geochemistry, Isolation and Characterization, G.R. Aiken, et al., (eds.), Wiley- Interscience, New York, NY.p. 8-9

Świetlika J., Dąbrowska A., Raczyk-Stanisławiak U., Nawrocki J., Reactivity of natural organic matter fractions with chlorine dioxide and ozone. Water Res. 38 (2004a) 547–558.

Tang, H.X., Luan, Z.K., 1995. Features and mechanism for coagulation flocculation process of polyaluminum chloride. *J. Environ. Sci.* 7 (2), 204–211 in Chinese.

Tang, H.X., 1990. Basic studies of inorganic polymer flocculants. *Environ. Chem.* 9 (3), 1–12 (in Chinese).

Bertsch, P.M., 1989. Aqueous polynuclear aluminum species. In: Sposito, G. (Ed.), *The Environmental Chemistry of Aluminum*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 87–115.

Tang, H.X., 1998. Flocculation morphology for hydroxyl polymer of polyaluminum chloride. *Acta Scientiae Circumstantiae* 18 (1), 1–10 in Chinese.

Tzoupanos, N.D., Zouboulis, A.I. and Tsoleridis, C.A. A systematic study for the characterization of a novel coagulant (polyaluminium silicate chloride). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 342, 3039, 2009.

Van Benschoten, J.E., Edzwald, J.K., 1990. Chemical aspect of coagulation using aluminum salts-I: hydrolytic reactions of alum and polyaluminum chloride. *Water Res.* 24, 1519e1526.

Van Benschoten, J.E., Edzwald, J.K., 1990b. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts-11. Coagulation of fulvic acid using alum and polyaluminum chloride. *Water Res.* 24 (12), 1527–1535.

Wang, D.S., Tang, H.X., 2001. Modified inorganic polymer flocculant- PFSi: its preparation, characterization and coagulation behavior. *Water Res.* 35, 3418–3428.

Wang, D.S., Sun, W., Xu, Y., Tang, H.X., Gregory, J., 2004. Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PACl. *Colloids Surf. A* 243, 1–10.

Wang, M., Muhammed, M., 1999. Novel synthesis of Al₁₃-cluster based aluminum materials. *Nanostruct. Mater.* 11 (8), 1219–1229.

Xiaoxiao Zhang, Zhonglian Yang, Yan Wang, Bao-Yu Gao, Qinyan Yue. The removal efficiency and reaction mechanism of aluminum coagulant on organic functional groups-carboxyl and hydroxyl. *Chemical Engineering Journal* 211–212 (2012)

Yan, M.Q., Wang, D.S., Yu, J.F., Edwards, M., Qu, J.H., 2008b. Enhanced coagulation with polyaluminum chlorides: role of pH/alkalinity and speciation. *Chemosphere* (in press). p. 3-4.

Zhao, H., Liu, H.J., Hu, C.Z., Qu, J.H., 2009. Effect of aluminum speciation and structure characterization on preferential removal of disinfection byproduct precursors by aluminum hydroxide coagulation. *Environ. Sci. Technol.* 43, 5067e5072.

ANEXO 1

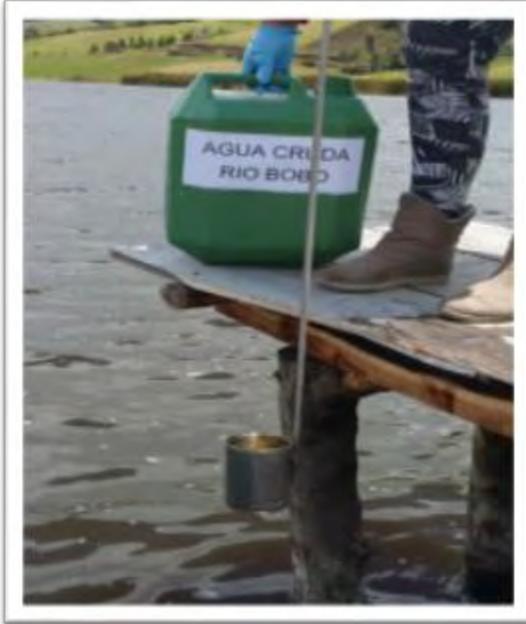
PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

La obtención de muestras de agua se efectuó mediante el siguiente procedimiento:

- a) Se partió de un recipiente de plástico bien limpio y purgado con el agua a analizar. Pueden utilizarse recipientes de vidrio, pero teniendo en cuenta los riesgos de roturas.
- b) Se tomaron dos muestras de agua, la primera del punto de caseta de interconexión correspondiente a las aguas del embalse Rio Bobo y la segunda del tanque de cruz amarillo correspondiente a las aguas de la quebrada Las Piedras para el posterior análisis.
- c) Se llenó el recipiente hasta el tope. Esto reduce la eventual pérdida de gases y, debido a ello, cambios en la composición química del agua.
- d) Se recogieron 120 L de agua en total. 40 L de Rio Bobo y 80 L de Las Piedras en cada uno de los muestreos.
- e) Se almacenaron las muestras a 4 °C durante toda la jornada de muestreo, para evitar posibles alteraciones en la composición química del agua.
- f) Las muestras se identificaron en forma segura. Se puede utilizar un papel adherido al recipiente o un marcador indeleble.

ANEXO 2

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS MUESTREOS



ANEXO 3

CÁLCULOS DE LA POTENCIA DE LA MUESTRA

Para todas las composiciones se aplicó la ecuación 2:

$$\varphi^2 = \frac{b \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2}$$

Donde: a= 6 y b= 6

- **Cálculo de φ valor en los datos de la conductividad de la composición 1**

Tabla 21. Pruebas de múltiple rangos para la conductividad por dosis de alcalinizante.

Método: 95,0 porcentaje LSD					
Dosis de alcalinizante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	$(\mu - \bar{x}_i)^2$
0	12	50,8667	1,67889	X	114,35
5	12	55,2333	1,67889	XX	40,03
10	12	59,3417	1,67889	X	4,92
15	12	64,4333	1,67889	X	8,26
20	12	67,6833	1,67889	XX	37,50
25	12	71,8217	1,67889	X	105,30
					= 310,36

Tabla 22. Análisis de Varianza para Conductividad - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Bloques	14656,3	5	2931,27	86,66	0,0000
B: Dosis alcalinizante	3724,18	5	744,835	22,02	0,0000
RESIDUOS	2063,26	61	33,8239		
TOTAL (CORREGIDO)	20443,8	71			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

$$\tau_i^2 = (\mu - \bar{x}_i)^2$$

$$\mu = 61,56$$

$$\sigma = 33,8239$$

Según la ecuación 2:

$$\varphi^2 = \frac{b \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2} = \frac{6 (210,36)}{6 (144,06)} = 0,27 \quad ; \quad \varphi = 0,52$$

- Cálculo de φ valor en los datos de la conductividad de la composición 2

Tabla 23. Pruebas de Múltiple Rangos para la conductividad por dosis de alcalinizante.

Método: 95,0 porcentaje LSD

Dosis Alcalinizante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	$(\mu - \bar{x}_i)^2$
0	12	52,6	0,938036	X	117,94
5	12	55,7917	0,938036	X	58,80
10	12	60,6	0,938036	X	8,18
15	12	66,625	0,938036	X	10,02
20	12	70,7583	0,938036	X	53,26
25	12	74,3917	0,938036	X	119,5

$= 367,7$

Tabla 24. Análisis de Varianza para Conductividad - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Bloques	10575,6	5	2115,12	200,32	0,0000
B: Dosis Alcalinizante	4412,48	5	882,496	83,58	0,0000
RESIDUOS	644,096	61	10,5589		
TOTAL (CORREGIDO)	15632,2	71			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

$$\tau_i^2 = (\mu - \bar{x}_i)^2$$

$\mu = 63,46$
 $\sigma = 10,5589$

$$\varphi^2 = \frac{b \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2} = \frac{6 (267,7)}{6 (141,49)} = 3,30 \quad ; \quad \varphi = 1,82$$

- Cálculo de φ valor en los datos de la conductividad de la composición 3

Tabla 25. Pruebas de Múltiple Rangos para la conductividad por dosis de alcalinizante.

Método: 95,0 porcentaje LSD

Dosis Alcalinizante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	$(\mu - \bar{x}_i)^2$
0	12	50,7333	0,509131	X	133,79
5	12	54,375	0,509131	X	62,81
10	12	58,4583	0,509131	X	14,76
15	12	64,85	0,509131	X	6,50
20	12	69,5	0,509131	X	5,84
25	12	74,9083	0,509131	X	158,97
					= 428,67

Tabla 24. Análisis de Varianza para Conductividad - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Bloques	3621,11	5	724,223	232,83	0,0000
B: Dosis Alcalinizante	5142,07	5	1028,41	330,62	0,0000
RESIDUOS	189,745	61	3,11057		
TOTAL	8952,93	71			
(CORREGIDO)					

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

$$\tau_i^2 = (\mu - \bar{x}_i)^2$$

$$\mu = 62,30$$

$$\sigma = 3,11057$$

$$\varphi^2 = \frac{b \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a \sigma^2} = \frac{6 (428,67)}{6 (9,68)} = 44,31 \quad ; \quad \varphi = 6,65$$

- Cálculo de φ valor en los datos de la conductividad de la composición 4

Tabla 26. Pruebas de Múltiple Rangos para la conductividad por dosis de alcalinizante.

Método: 95,0 porcentaje LSD

Dosis Alcalinizante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	$(\mu - \bar{x}_i)^2$
0	12	49,025	0,337015	X	151,66
5	12	52,7417	0,337015	X	73,93
10	12	58,1333	0,337015	X	10,28
15	12	63,8083	0,337015	X	6,09
20	12	69,7417	0,337015	X	70,59
25	12	74,6083	0,337015	X	176,05
					= 488,6

Tabla 26. Análisis de Varianza para Conductividad - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Dosis Alcalinizante	5863,23	5	1172,65	40,53	0,0000
RESIDUOS	1909,67	66	28,9343		
TOTAL (CORREGIDO)	7772,9	71			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

$$\tau_i^2 = (\mu - \bar{x}_i)^2$$

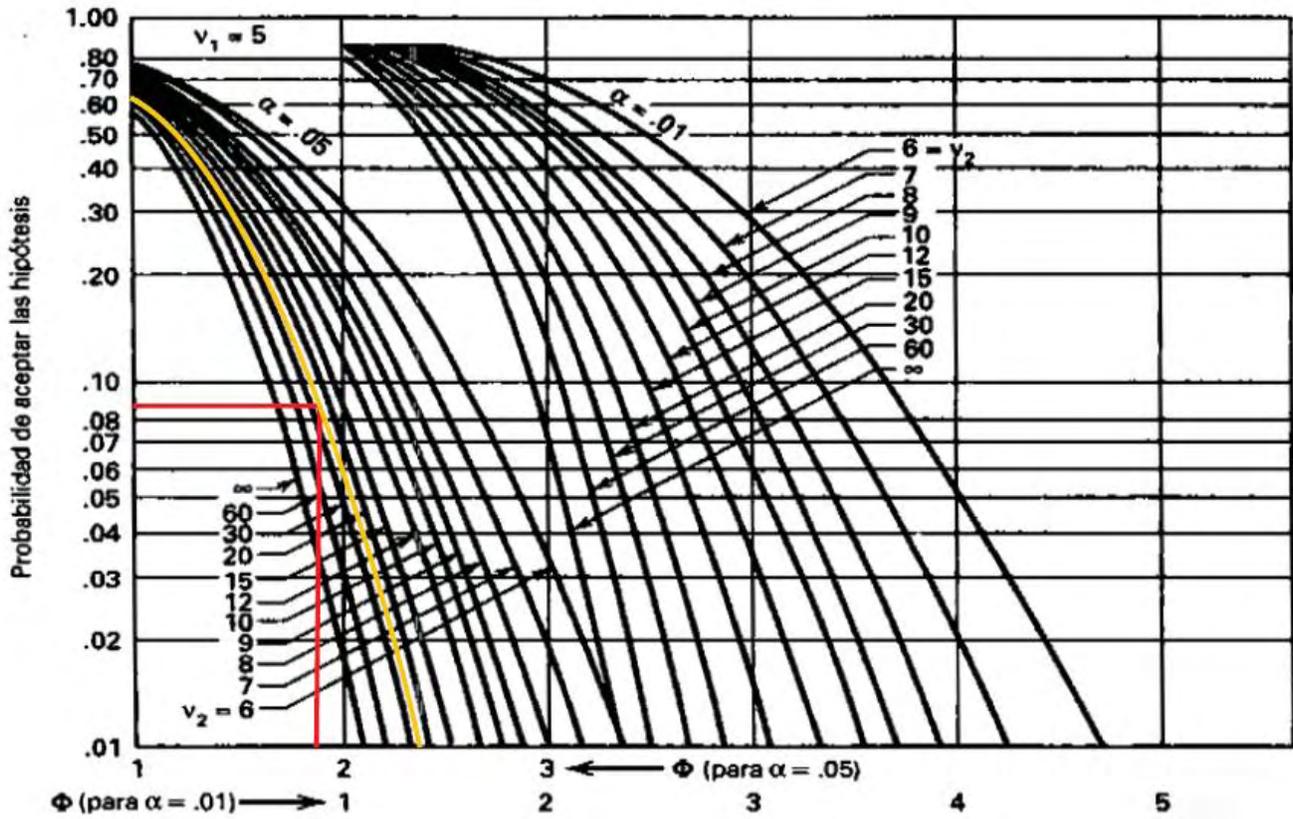
$$\mu = 61,34$$

$$\sigma = 3,11057$$

$$\varphi^2 = \frac{b \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2} = \frac{6 (468,6)}{6 (837,2)} = 0,58 \quad ; \quad \varphi = 0,7$$

ANEXO 4

GRÁFICOS DE LAS CURVAS DE OPERACIÓN CARACTERÍSTICA



ANEXO 5

REGISTRO DE DATOS OBTENIDOS POR LOS MUESTREOS

REGISTRO DE MUESTREO 1

Tabla 1. Composición 100% agua de Las Piedras y 0% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA LAS PIEDRAS					DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA RIO BOBO								
pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)				
8,65	18,7	2,34	66	37,8	7,80	13,7	10,3	160	41,9				
% RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100					PARAMETROS DE MEZCLA								
Nº Jarrón	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	60	0	7,32	13,1	1,09	20	46,9	69,7	53,42	300	15	40	3,30
2	60	5	7,33	16,2	1,12	14	51,8	78,79	52,14				
3	60	10	7,39	19,6	1,15	13	57,6	80,30	50,85				
4	60	15	7,42	22,1	1,02	12	62,5	81,81	56,41				
5	60	20	7,46	24,4	1,48	13	66,3	80,30	36,75				
6	60	25	7,48	27,3	1,01	11	73,8	83,33	56,84				
RÉPLICA % RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarrón	Coagulante µL	Dosis alcalinizante	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)

ppm										
1	60	0	7,32	13,3	1,11	21	46,8	68,18	52,56	
2	60	5	7,34	16,5	1,15	13	51,8	80,30	50,85	300 15 40 3,30
3	60	10	7,38	19,2	1,14	13	57,7	80,30	51,28	TIEMPO SEDIMENTACION
4	60	15	7,43	22,4	0,98	11	62,2	83,33	58,12	S min horas otros
5	60	20	7,45	24,2	1,46	10	66,4	84,84	37,61	
6	60	25	7,47	27,1	1,03	9	73,9	86,36	55,98	----- 40 -----

Tabla 2. Composición 80% agua de Las Piedras y 20% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH		Alcalinidad mg/L CaCO ₃			Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
8,51		14,5			4,21		83		38,7				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	Coagulan	Dosis	pH	Alcalinidad	Turbied	Color	Conductivid	%	%	Rápida	Tiemp	Lent	Tiemp
a	te µL	alcaliniz		mg/L	ad NTU	Aparente	ad (S/m)	Remoción	Remoció	r.p.m	o (s)	a	o
		ante		CaCO ₃		UPC		color	n			r.p.	(min)
		ppm							turbieda			m	
									d				
1	65	0	7,82	14,5	1,03	16	54,5	80,72	75,53				
2	65	5	7,74	16,1	1,51	14	56,2	83,13	64,13	300	15	40	3,30
3	65	10	7,32	17,1	1,10	13	59,1	84,34	73,87	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	65	15	7,33	19,6	0,92	10	62,8	87,96	78,14	S	min	horas	otros
5	65	20	7,34	22,3	0,80	8	70,4	90,37	81,0				
6	65	25	7,39	24,4	0,85	9	73,6	89,16	79,81	-----	40	-----	-----

RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoci ón turbieda d	Rápida r.p.m	Tiemp o (s)	Lent a r.p.m	Tiemp o (min)
1	65	0	7,83	14,1	1,02	18	54,5	78,31	75,77	300	15	40	
2	65	5	7,75	15,8	1,53	13	56,3	84,34	63,66				
3	65	10	7,34	17,2	1,11	11	59,2	86,75	73,63				
4	65	15	7,32	19,3	0,95	10	62,8	87,95	77,43				
5	65	20	7,35	22,6	0,83	9	70,3	89,16	80,28				
6	65	25	7,37	24,7	0,87	7	73,5	91,56	79,33				
										TIEMPO SEDIMENTACION			
										S	min	horas	otros
										-----	40	-----	-----

Tabla 3. Composición 60% agua de Las Piedras y 40% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH			Alcalinidad mg/L CaCO ₃			Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)			
8,29			16,9			5,42		103		39,6			
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Coagulan te µL	Dosis alcalin izante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,10	11,5	2,11	25	49,0	75,73	59,60				

2	60	5	6,98	15,0	1,60	19	56,1	81,55	70,48	300	15	40	3,30
3	60	10	7,02	16,8	1,04	9	59,7	91,26	80,81	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,09	18,7	0,82	7	64,0	93,20	84,87	S	min	horas	otros
5	60	20	7,12	22,3	0,64	11	70,1	89,32	88,20				
6	60	25	7,15	23,6	1,30	12	71,7	88,35	76,01	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	coagulant e µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	60	0	7,09	11,3	2,15	28	49,1	72,81	60,33				
2	60	5	7,00	14,5	1,64	20	56,2	80,58	69,74	300	15	40	
3	60	10	7,03	16,5	1,10	10	59,5	90,29	79,71	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,08	18,6	0,88	8	63,9	92,23	83,76	S	min	horas	otros
5	60	20	7,13	22,1	0,71	10	69,8	90,29	86,90				
6	60	25	7,15	23,7	1,37	11	71,9	89,32	74,72	-----	40	-----	-----

Tabla 4. Composición 40% agua de Las Piedras y 60% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA														
			pH	Alcalinidad mg/L CaCO₃		Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
			8,18	15,2		7,13		120		40,4				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA				
NºJ	Coagulan	Dosis	pH	Alcalinidad	Turbiedad	Color	Conductividad	%	%	Rápida	Tiempo	Lenta	Tiempo	

arra	te μ L	alcaliniza nte ppm	mg/L CaCO ₃	ad NTU	Aparente UPC	ad (S/m)	Remoción color	Remoción turbiedad	a r.p.m	o (s)	r.p.m	o (min)	
1	60	0	7,32	11,6	0,55	25	49,4	79,16	92,28				
2	60	5	7,18	14,3	1,97	21	53,8	82,50	72,37	300	15	40	3,30
3	60	10	7,25	17,2	1,64	19	59,4	84,16	77,0	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,24	19,7	1,58	15	64,5	87,50	77,84	S	min	horas	otros
5	60	20	7,30	22,9	1,44	16	69,9	86,66	79,80				
6	60	25	7,31	25,6	1,25	15	74,3	87,50	82,47	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarra	coagulant e μ L	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,30	11,2	0,52	26	49,6	78,33	92,71				
2	60	5	7,17	14,1	1,96	24	53,9	80,00	72,51	300	15	40	
3	60	10	7,23	17,5	1,65	20	59,6	83,33	76,86	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,24	19,5	1,59	16	64,6	86,66	77,70	S	min	horas	otros
5	60	20	7,28	22,2	1,46	17	69,9	85,83	79,52				
6	60	25	7,30	25,2	1,26	15	74,4	87,50	82,33	-----	40	-----	-----

REGISTRO DE MUESTREO 2

Tabla 5. Composición 100% agua de Las Piedras y 0% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA LAS PIEDRAS					DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA RIO BOBO								
pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)				
9,09	17,2	2,35	55	38,3	8,15	14,7	9,69	163	42,5				
% RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100					PARAMETROS DE MEZCLA								
Nº Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinida d mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiemp o (s)	Lent a r.p.m	Tiemp o (min)
1	55	0	7,37	11,9	1,21	18	41,4	67,27	48,51	300	15	40	3,30
2	55	5	7,32	15,8	1,33	16	47,5	70,91	43,40				
3	55	10	7,37	16,9	1,09	15	50,8	72,72	53,62				
4	55	15	7,39	21,0	0,95	12	57,7	78,18	59,57				
5	55	20	7,43	23,8	1,07	16	63,2	70,91	54,47				
6	55	25	7,48	27,6	1,09	12	69,5	78,18	53,62				
RÉPLICA % RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante	pH	Alcalinida d mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)

ppm									
1	55	0	7,36	12,3	1,19	19	41,6	65,45	49,36
2	55	5	7,30	16,1	1,31	17	47,7	69,09	44,25
3	55	10	7,35	17,2	1,07	14	50,9	74,54	54,47
4	55	15	7,37	21,4	0,93	11	57,9	80,00	60,42
5	55	20	7,43	24,1	1,05	14	63,3	74,54	55,32
6	55	25	7,48	27,7	1,10	10	69,6	81,81	53,20

300	15	40	3,30
TIEMPO SEDIMENTACION			
S	min	horas	otros
40			

Tabla 6. Composición 80% agua de Las Piedras y 20% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH		Alcalinidad mg/L CaCO ₃			Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
8,9		15,6			3,80		74		39,2				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	Volumen Coagulan	Dosis alcaliniz	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	60	0	7,29	10,6	1,78	18	54,5	75,67	53,16				
2	60	5	7,28	14,3	1,43	14	56,2	81,08	62,37	300	15	40	3,30
3	60	10	7,29	16,9	1,54	15	59,1	79,73	59,47	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,31	19,4	1,40	11	62,8	85,14	63,16	S	min	horas	otros
5	60	20	7,33	23,5	1,06	13	70,4	82,43	72,11				
6	60	25	7,37	24,9	1,26	14	73,6	81,08	66,84	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			

Nº Jarr a	Volumen coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,30	10,9	1,79	20	54,6	72,97	52,89				
2	60	5	7,27	14,5	1,43	14	56,3	81,08	62,37	300	15	40	
3	60	10	7,28	17,1	1,56	14	59,2	81,08	58,95	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,30	19,6	1,39	10	62,7	86,49	63,42	S	min	horas	otros
5	60	20	7,32	23,1	1,04	12	70,2	83,78	72,63				
6	60	25	7,35	25,6	1,25	13	73,5	82,43	67,10	-----	40	-----	-----

Tabla 7. Composición 60% agua de Las Piedras y 40% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
			pH 8,6	Alcalinidad mg/L CaCO₃ 16,2		Turbiedad NTU 5,14		Color Aparente UPC 95		Conductividad (S/m) 39,5			
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,14	10,4	1,58	19	54,6	80,0	69,26				
2	60	5	7,19	14,1	1,00	18	51,1	81,05	80,54	300	15	40	3,30
3	60	10	7,20	17,0	0,80	16	55,7	83,16	84,43	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,23	17,4	0,58	12	63,3	87,37	88,72	S	min	horas	otros
5	60	20	7,26	23,2	0,74	13	66,9	86,32	85,60				

6	60	25	7,27	25,1	0,83	15	75,6	84,21	83,85	----	40	----	----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,16	10,1	1,58	18	54,6	81,05	69,26				
2	60	5	7,17	13,9	0,98	16	51,2	83,16	80,93	300	15	40	
3	60	10	7,18	16,8	0,79	15	55,6	84,21	84,63	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,22	17,6	0,56	11	63,2	88,42	89,10	S	min	horas	otros
5	60	20	7,24	22,8	0,72	12	66,8	87,37	85,99				
6	60	25	7,26	25,3	0,81	13	75,5	86,31	84,24	----	40	----	----

Tabla 8. Composición 40% agua de Las Piedras y 60% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
			pH 8,4	Alcalinidad mg/L CaCO₃ 15,3		Turbiedad NTU 6,54		Color Aparente UPC 115		Conductividad (S/m) 40,2			
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,25	10,8	1,45	16	48,9	86,09	77,83				

2	60	5	7,17	13,1	0,90	15	49,7	86,96	86,24	300	15	40	3,30
3	60	10	7,15	13,9	0,85	16	51,9	86,09	87,00	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,16	16,3	0,90	13	58,7	88,70	86,24	S	min	horas	otros
5	60	20	7,20	23,2	0,91	15	68,3	86,96	86,08				
6	60	25	7,23	25,2	0,69	14	73,3	87,82	89,45	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	Volumen coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	60	0	7,26	10,4	1,45	17	48,8	85,21	77,83				
2	60	5	7,16	12,9	0,89	14	49,6	87,83	86,39	300	15	40	
3	60	10	7,16	13,7	0,84	12	51,9	89,56	87,16	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,15	16,1	0,87	11	58,7	90,43	86,70	S	min	horas	otros
5	60	20	7,21	22,8	0,92	15	68,2	86,95	85,93				
6	60	25	7,23	24,9	0,70	13	73,4	88,69	89,30	-----	40	-----	-----

REGISTRO DE MUESTREO 3

Tabla 9. Composición 100% agua de Las Piedras y 0% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA LAS PIEDRAS					DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA RIO BOBO								
pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)				
8,84	17,9	2,28	62	35,3	8,12	14,2	9,86	152	43,5				
% RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100					PARAMETROS DE MEZCLA								
Nº Jarra	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	65	0	7,18	11,8	1,10	23	48,6	62,90	51,75	300	15	40	3,30
2	65	5	7,17	14,3	0,95	16	50,6	74,20	58,33				
3	65	10	7,19	19,2	0,92	16	53,8	74,20	59,65				
4	65	15	7,23	22,5	0,82	13	58,7	79,03	64,03				
5	65	20	7,25	26,6	0,91	15	65,7	75,81	60,09				
6	65	25	7,33	28,0	1,07	16	70,4	74,20	53,07				
RÉPLICA % RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarra	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)

1	65	0	7,20	11,4	1,09	22	48,5	64,52	52,20	300 15 40 3,30 TIEMPO DE SEDIMENTACION S min horas otros 40
2	65	5	7,18	14,1	0,94	16	50,7	74,19	58,77	
3	65	10	7,20	18,9	0,90	15	53,9	75,81	60,53	
4	65	15	7,24	22,1	0,81	12	58,7	80,64	64,47	
5	65	20	7,26	26,2	0,89	14	65,6	77,42	60,96	
6	65	25	7,35	28,2	1,06	15	70,3	75,81	53,51	

Tabla 10. Composición 80% agua de Las Piedras y 20% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH		Alcalinidad mg/L CaCO₃				Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)			
8,71		17,5				3,69		79		37,1			
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	Volumen Coagulan	Dosis alcaliniz	pH	Alcalinidad mg/L CaCO₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	60	0	7,10	12,8	1,28	21	44,7	73,42	65,31	300 15 40 3,30 TIEMPO SEDIMENTACION S min horas otros ----- 40 ----- -----			
2	60	5	7,07	14,9	0,93	16	49,8	79,75	74,80				
3	60	10	7,09	17,3	0,92	14	55,4	82,28	75,07				
4	60	15	7,13	22,1	0,86	12	61,9	84,81	76,70				
5	60	20	7,16	25,2	1,04	14	65,4	82,28	75,07				
6	60	25	7,19	26,6	0,94	16	71,8	79,75	74,80				
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE			

N° Jarr a	Volumen coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	MEZCLA			
										Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,09	13,1	1,27	22	44,6	72,15	65,58				
2	60	5	7,06	15,2	0,92	16	49,7	79,75	75,07	300	15	40	
3	60	10	7,08	17,4	0,91	13	55,2	83,54	75,34	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,12	21,9	0,87	13	61,8	83,54	76,42	S	min	horas	otros
5	60	20	7,15	24,8	1,03	14	65,2	82,28	72,08				
6	60	25	7,18	26,9	0,92	15	71,6	81,01	75,07	-----	40	-----	-----

Tabla 11. Composición 60% agua de Las Piedras y 40% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH		Alcalinidad mg/L CaCO ₃			Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
8,47		16,6			4,98		96		38,6				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
N° Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	6,91	11,9	1,16	18	50,4	81,25	76,71				
2	60	5	6,94	13,9	1,11	14	51,7	84,42	77,71	300	15	40	3,30
3	60	10	6,95	17,9	1,13	12	56,2	87,50	77,31	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	6,98	21,2	0,91	11	64,4	88,54	81,73	S	min	horas	otros

5	60	20	7,03	28,0	1,17	14	66,9	84,42	76,51				
6	60	25	7,08	28,8	1,02	15	73,7	83,33	79,52	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	6,90	12,1	1,16	18	50,3	81,25	76,71				
2	60	5	6,93	14,2	1,12	13	51,9	86,46	77,51	300	15	40	
3	60	10	6,96	16,7	1,14	12	56,1	87,50	77,11	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	6,98	20,9	0,91	10	64,2	89,58	81,73	S	min	horas	otros
5	60	20	7,04	27,2	1,17	16	66,9	83,33	76,51				
6	60	25	7,09	29,1	1,05	14	73,6	85,42	78,92	-----	40	-----	-----

Tabla 12. Composición 40% agua de Las Piedras y 60% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA														
			pH	Alcalinidad mg/L CaCO₃		Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
			8,41	15,6		5,91		114		40,2				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA				
Nº Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)	

1	60	0	7,14	14,0	1,50	22	47,4	80,70	74,62	300 15 40 3,30 TIEMPO SEDIMENTACION S min horas otros ----- 40 ----- -----			
2	60	5	7,11	16,9	1,25	21	52,2	81,58	78,85				
3	60	10	7,13	18,2	1,12	19	59,4	83,33	81,05				
4	60	15	7,14	21,9	1,25	15	63,6	86,84	78,85				
5	60	20	7,19	24,1	1,23	16	68,4	85,96	79,19				
6	60	25	7,23	24,8	1,08	15	73,9	86,84	81,73				
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,15	14,2	1,51	23	47,4	79,82	74,45	300 15 40 TIEMPO SEDIMENTACION S min horas otros ----- 40 ----- -----			
2	60	5	7,10	17,1	1,25	20	52,1	82,45	78,85				
3	60	10	7,12	18,5	1,13	17	59,3	85,09	80,88				
4	60	15	7,14	21,7	1,26	14	63,5	87,72	78,68				
5	60	20	7,18	24,2	1,20	16	68,5	85,96	79,69				
6	60	25	7,22	25,3	1,07	13	73,8	88,60	81,89				

REGISTRO DE MUESTREO 4

Tabla 13. Composición 100% agua de Las Piedras y 0% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA LAS PIEDRAS					DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA RIO BOBO								
pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)				
8,75	13,3	2,10	78	28,41	7,97	16,4	8,92	140	47,0				
% RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100					PARAMETROS DE MEZCLA								
Nº Jarra	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	70	0	7,32	8,1	0,99	9	38,5	88,46	52,86	300	15	40	3,30
2	70	5	7,29	13,9	0,30	5	43,5	93,59	85,71				
3	70	10	7,31	14,6	1,10	7	48,6	91,02	47,62				
4	70	15	7,34	17,7	1,18	8	54,6	89,74	43,81				
5	70	20	7,38	21,2	1,14	11	59,6	85,90	45,71				
6	70	25	7,43	22,5	1,12	10	64,9	87,18	46,66				
RÉPLICA % RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarra	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)

ppm									
1	70	0	7,32	9,2	0,98	11	38,4	85,90	53,33
2	70	5	7,29	12,3	0,32	6	43,6	92,31	84,76
3	70	10	7,30	14,9	1,09	7	48,7	91,02	48,01
4	70	15	7,35	17,4	1,15	8	54,7	89,74	45,23
5	70	20	7,37	20,8	1,13	12	59,8	84,61	46,19
6	70	25	7,42	22,8	1,12	9	64,8	88,46	46,66
300 15 40 3,30									
TIEMPO SEDIMENTACION									
S min horas otros									
40									

Tabla 14. Composición 80% agua de Las Piedras y 20% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH		Alcalinidad mg/L CaCO ₃			Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
8,56		13,8			3,36		88		32,3				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	65	0	7,09	14,9	0,88	17	42,0	89,77	73,81				
2	65	5	7,07	15,1	0,94	13	47,8	85,23	72,02	300	15	40	3,30
3	65	10	7,17	16,0	1,07	16	52,8	81,81	68,15	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	65	15	7,27	18,8	1,11	9	56,7	80,68	66,96	S	min	horas	otros
5	65	20	7,30	21,4	0,90	15	61,1	82,95	73,21				
6	65	25	7,31	24,0	0,99	14	69,2	84,09	70,54	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			

Nº Jarrón	Volumen coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	65	0	7,11	14,4	0,87	18	42,1	79,54	74,11	300	15	40	
2	65	5	7,08	15,3	0,92	12	47,6	86,36	72,62				
3	65	10	7,16	16,7	1,06	14	52,9	84,09	68,45				
4	65	15	7,27	18,8	1,12	11	56,6	87,50	66,66				
5	65	20	7,31	21,7	0,93	13	61,3	85,23	72,32				
6	65	25	7,32	24,3	0,98	15	69,4	82,95	70,83				
TIEMPO SEDIMENTACION										S	min	horas	otros
										-----	40	-----	-----

Tabla 15. Composición 60% agua de Las Piedras y 40% agua de Río Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
			pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃		Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)			
			8,31	14,5		4,78		101		35,2			
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarrón	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	65	0	6,98	10,2	1,10	18	44,0	87,13	76,99	300	15	40	3,30
2	65	5	6,99	13,3	1,25	12	50,0	88,12	73,85				
3	65	10	7,04	14,9	1,21	15	55,9	85,15	74,69				
4	65	15	7,09	18,4	1,13	14	59,3	86,14	76,36				
5	65	20	7,13	19,3	1,14	13	64,5	82,18	76,15				
TIEMPO SEDIMENTACION										S	min	horas	otros

6	65	25	7,23	23,8	1,34	16	69,5	83,17	71,97	----	40	----	----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	65	0	6,99	10,6	1,08	20	44,2	80,20	77,41				
2	65	5	7,00	13,8	1,23	14	50,1	86,14	74,27	300	15	40	
3	65	10	7,03	15,3	1,20	15	55,7	85,15	74,90	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	65	15	7,09	18,6	1,11	13	59,4	87,13	76,78	S	min	horas	otros
5	65	20	7,12	19,4	1,13	16	64,7	84,16	76,36				
6	65	25	7,20	23,3	1,30	15	69,2	85,15	72,80	----	40	----	----

Tabla 16. Composición 40% agua de Las Piedras y 60% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
			pH 8,43	Alcalinidad mg/L CaCO₃ 15,3		Turbiedad NTU 5,98		Color Aparente UPC 113		Conductividad (S/m) 38,4			
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	60	0	7,30	10,2	0,88	21	44,1	85,84	85,28				

2	60	5	7,14	12,6	0,87	14	48,9	87,61	85,45	300	15	40	3,30
3	60	10	7,15	13,8	0,98	18	54,0	84,07	83,61	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,20	18,9	0,77	15	60,9	86,73	87,12	S	min	horas	otros
5	60	20	7,24	21,6	0,99	16	66,7	81,42	83,44				
6	60	25	7,26	24,1	0,89	14	71,1	87,61	85,12	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	Volumen coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	60	0	7,29	10,4	0,91	19	44,3	83,19	84,78				
2	60	5	7,12	12,9	0,88	14	48,9	87,61	85,28	300	15	40	
3	60	10	7,15	14,4	0,96	16	54,1	85,84	83,95	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	60	15	7,21	18,7	0,79	13	60,8	88,50	86,79	S	min	horas	otros
5	60	20	7,25	21,9	1,01	15	66,7	86,73	83,11				
6	60	25	7,27	24,3	0,92	14	71,2	87,61	84,62	-----	40	-----	-----

REGISTRO DE MUESTREO 5

Tabla 17. Composición 100% agua de Las Piedras y 0% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA LAS PIEDRAS					DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA RIO BOBO								
pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)				
9,85	28,5	2,97	77	61,5	8,59	15,6	6,43	104	41,5				
% RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100					PARAMETROS DE MEZCLA								
Nº Jarra	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	170	0	7,50	13,8	0,88	7	78,0	90,91	70,37	300	15	40	3,30
2	170	5	7,20	14,6	0,56	6	85,5	92,21	81,14				
3	170	10	7,22	17,9	0,50	5	90,0	93,51	83,17				
4	170	15	7,27	21,7	0,45	3	95,4	96,10	84,85				
5	170	20	7,41	23,8	0,36	10	100,8	87,01	87,88				
6	170	25	7,43	26,3	0,49	4	106,5	94,80	83,50				
RÉPLICA % RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100										PARAMETROS DE MEZCLA			
NºJar	Volumen	Dosis	pH	Alcalinidad	Turbiedad	Color	Conductividad	%	%	Rápida	Tiempo	Lenta	Tiempo

ra	Coagulan te μL	alcaliniz ante ppm		mg/L CaCO_3	d NTU	Aparent e UPC	ad (S/m)	Remoción color	Remoción turbiedad	r.p.m	o (s)	r.p.m	(min)
1	170	0	7,53	13,6	0,87	10	78,3	87,01	70,70	300	15	40	3,30
2	170	5	7,21	14,8	0,54	7	85,7	81,82					
3	170	10	7,24	17,5	0,52	6	90,1	82,49					
TIEMPO DE SEDIMENTACION													
4	170	15	7,26	21,2	0,47	3	95,5	96,10	84,17	S	min	horas	otros
5	170	20	7,38	23,6	0,34	12	100,9	84,41	88,55	40			
6	170	25	7,42	25,9	0,46	5	106,8	93,51	84,51				

Tabla 18. Composición 80% agua de Las Piedras y 20% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH		Alcalinidad mg/L CaCO_3			Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
9,54		25,5			3,67		85		58,5				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen Coagulan te μL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO_3	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	130	0	6,93	13,6	1,23	17	76,5	80,00	66,48	300	15	40	3,30
2	130	5	7,01	14,3	1,11	15	80,5	69,75					
3	130	10	6,99	16,7	0,98	12	87,7	85,88	73,28				
TIEMPO SEDIMENTACION													
4	130	15	7,03	19,1	0,91	9	92,0	89,41	75,20	S	min	horas	otros
5	130	20	7,04	21,5	0,94	7	97,0	91,76	74,39	40			
6	130	25	7,06	23,9	0,63	5	101,9	94,12	82,83				

RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarrón	Volumen coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	130	0	6,87	13,2	1,25	18	76,7	78,82	65,94				
2	130	5	6,98	14,5	1,13	15	80,6	80,5	69,21	300	15	40	
3	130	10	7,03	16,9	0,99	13	87,8	84,71	73,02	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	130	15	7,04	18,8	0,90	8	92,0	90,59	75,48	S	min	horas	otros
5	130	20	7,06	21,3	0,96	7	97,1	91,76	73,84				
6	130	25	7,09	23,8	0,67	3	101,8	96,47	81,74	-----	40	-----	-----

Tabla 19. Composición 60% agua de Las Piedras y 40% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
			pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃		Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)			
			9,37	24,3		4,31		87		54,2			
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarrón	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	110	0	7,41	14,3	0,56	12	64,2	86,21	87,01				
2	110	5	7,42	16,0	0,46	7	69,8	91,95	89,33	300	15	40	3,30

3	110	10	7,42	17,2	0,47	6	71,0	93,10	89,10	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	110	15	7,41	21,2	0,48	9	80,5	89,65	88,86	S	min	horas	otros
5	110	20	7,45	22,9	0,35	7	85,9	91,96	91,88				
6	110	25	7,47	27,5	1,53	5	91,7	94,25	64,50	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	Volumen coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	110	0	7,50	14,7	0,60	15	64,1	82,76	86,08				
2	110	5	7,39	16,3	0,47	9	69,7	89,65	89,10	300	15	40	
3	110	10	7,40	17,8	0,49	7	71,0	91,96	88,63	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	110	15	7,38	21,4	0,45	10	80,5	88,51	89,56	S	min	horas	otros
5	110	20	7,47	23,1	0,37	6	85,8	93,10	91,41				
6	110	25	7,48	27,3	1,48	3	91,6	96,55	65,66	-----	40	-----	-----

Tabla 20. Composición 40% agua de Las Piedras y 60% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA														
			pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃		Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
			9,35	21,3		4,61		90		50,2				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA				
Nº Jarr	Volumen Coagulan	Dosis alcaliniza	pH	Alcalinidad mg/L	Turbiedad NTU	Color Aparente	Conductividad (S/m)	% Remoción	% Remoción	Rápida	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo	

a	te μL	nte ppm	CaCO_3		UPC		color	turbiedad	r.p.m	(min)			
1	85	0	7,27	14,2	0,79	15	59,4	83,33	82,86				
2	85	5	7,23	16,6	0,57	11	62,7	78,77	87,64	300 15 40 3,30			
3	85	10	7,24	17,9	0,59	2	69,9	97,77	87,20	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	85	15	7,26	22,4	0,65	1	75,1	98,88	85,90	S min horas otros			
5	85	20	7,28	23,5	1,00	1	79,5	98,88	78,31				
6	85	25	7,33	28,3	0,56	1	85,3	98,88	87,85	----- 40 -----			
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen coagulante μL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO_3	Turbiedad ad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	85	0	7,29	14,4	0,79	13	59,5	85,55	82,86				
2	85	5	7,21	16,4	0,56	9	62,7	87,77	87,85	300 15 40			
3	85	10	7,23	17,8	0,60	4	69,8	95,55	86,98	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	85	15	7,26	21,9	0,65	2	75,2	97,77	85,90	S min horas otros			
5	85	20	7,27	23,8	0,99	1	79,4	98,88	78,52				
6	85	25	7,33	27,6	0,57	1	85,1	98,88	87,64	----- 40 -----			

REGISTRO DE MUESTREO 6

Tabla 21. Composición 100% agua de Las Piedras y 0% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA LAS PIEDRAS					DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA RIO BOBO								
pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)				
8,34	15,2	2,25	46	30,5	7,57	18,4	6,83	115	41,2				
% RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100					PARAMETROS DE MEZCLA								
Nº Jarra	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	60	0	6,71	8,50	1,12	16	39,4	65,22	50,22	300	15	40	3,30
2	60	5	6,79	11,8	0,83	14	43,8	69,57	63,11				
3	60	10	6,91	15,0	0,74	11	50,4	76,09	67,11				
4	60	15	6,97	18,7	0,65	9	54,2	80,43	71,11				
5	60	20	7,04	22,9	0,55	12	60,1	73,91	75,55				
6	60	25	7,10	23,5	0,59	15	64,9	67,39	73,77				
RÉPLICA % RIO BOBO: 0 - % LAS PIEDRAS: 100										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarra	Volumen Coagulante µL	Dosis alcalinizante	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)

ppm									
1	60	0	6,73	8,54	1,13	17	39,6	63,04	49,77
2	60	5	6,80	12,6	0,85	13	43,5	69,56	62,22
3	60	10	6,90	15,3	0,76	12	50,2	73,91	66,22
4	60	15	6,98	18,9	0,66	7	54,3	84,78	70,66
5	60	20	7,06	22,2	0,58	11	60,0	76,09	74,22
6	60	25	7,08	23,8	0,62	16	64,7	65,22	72,44
300 15 40 3,30									
TIEMPO SEDIMENTACION									
S min horas otros									
40									

Tabla 22. Composición 80% agua de Las Piedras y 20% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH		Alcalinidad mg/L CaCO ₃			Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
7,99		14,4			2,84		68		32,6				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	55	0	7,22	11,2	1,05	19	40,3	72,06	63,03				
2	55	5	7,14	14,3	0,97	16	44,5	76,47	65,84				
3	55	10	7,11	16,5	0,75	15	50,0	77,94	73,59				
4	55	15	7,12	21,1	1,16	13	55,3	80,88	59,15				
5	55	20	7,20	23,1	1,10	16	60,4	76,47	61,27				
6	55	25	7,21	25,9	1,14	12	66,8	82,35	59,86				
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE			
										300	15	40	3,30
										TIEMPO SEDIMENTACION			
										S	min	horas	otros
										-----	40	-----	-----

N° Jarr a	Volumen coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	MEZCLA			
										Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	55	0	7,24	11,4	1,07	18	40,4	73,53	62,32				
2	55	5	7,13	14,5	0,95	15	44,5	77,94	66,55	300	15	40	
3	55	10	7,12	16,8	0,77	13	50,2	80,88	72,89	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	55	15	7,10	21,4	1,18	12	55,2	82,35	58,45	S	min	horas	otros
5	55	20	7,18	23,9	1,13	15	60,5	77,94	60,21				
6	55	25	7,20	25,7	1,17	11	66,7	83,82	58,80	-----	40	-----	-----

Tabla 23. Composición 60% agua de Las Piedras y 40% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA													
pH		Alcalinidad mg/L CaCO ₃			Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
7,87		15,3			3,67		76		34,6				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
N° Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	55	0	7,21	9,8	1,27	25	42,2	67,10	65,39				
2	55	5	7,17	12,9	0,81	15	47,4	80,26	77,93	300	15	40	3,30
3	55	10	7,14	15,6	0,94	14	52,5	81,58	74,39	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	55	15	7,15	20,1	1,05	17	57,7	77,63	71,39	S	min	horas	otros

5	55	20	7,14	25,0	1,09	16	62,9	78,95	70,30				
6	55	25	7,18	27,0	1,11	14	68,6	81,58	69,75	-----	40	-----	-----
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr a	Volumen coagulant e µL	Dosis alcaliniza nte ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)
1	55	0	7,19	10,2	1,28	24	42,1	68,42	65,12				
2	55	5	7,16	13,1	0,80	16	47,3	78,95	78,20	300	15	40	
3	55	10	7,12	15,9	0,95	13	52,6	82,89	74,11	TIEMPO SEDIMENTACION			
4	55	15	7,15	20,5	1,07	18	57,8	76,32	70,84	S	min	horas	otros
5	55	20	7,13	25,9	1,11	14	62,8	81,58	69,75				
6	55	25	7,19	27,6	1,13	12	68,4	84,21	69,21	-----	40	-----	-----

Tabla 24. Composición 40% agua de Las Piedras y 60% agua de Rio Bobo.

DATOS PRELIMINARES AGUA CRUDA														
			pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃		Turbiedad NTU		Color Aparente UPC		Conductividad (S/m)				
			7,75	21,3		4,61		90		35,2				
% RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA				
Nº Jarr a	Volumen Coagulan te µL	Dosis alcaliniz ante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	Turbied ad NTU	Color Aparente UPC	Conductivid ad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápid a r.p.m	Tiemp o (s)	Lenta r.p.m	Tiemp o (min)	

1	55	0	7,09	12,0	1,68	24	44,8	73,33	63,56	300 15 40 3,30 TIEMPO SEDIMENTACION S min horas otros ----- 40 -----			
2	55	5	7,03	14,4	1,24	16	49,1	82,22	73,10				
3	55	10	7,05	16,2	1,03	14	54,1	84,44	77,66				
4	55	15	7,06	19,9	0,81	9	60,0	90,00	82,43				
5	55	20	7,07	21,5	0,92	7	65,8	92,22	80,04				
6	55	25	7,10	23,7	0,83	5	69,7	94,44	82,00				
RÉPLICA % RIO BOBO: 20 - % LAS PIEDRAS: 80										PARAMETROS DE MEZCLA			
Nº Jarr	Volumen coagulante µL	Dosis alcalinizante ppm	pH	Alcalinidad mg/L CaCO₃	Turbiedad NTU	Color Aparente UPC	Conductividad (S/m)	% Remoción color	% Remoción turbiedad	Rápida r.p.m	Tiempo (s)	Lenta r.p.m	Tiempo (min)
1	55	0	7,08	12,1	1,65	22	44,7	75,55	64,21	300 15 40 TIEMPO SEDIMENTACION S min horas otros ----- 40 -----			
2	55	5	7,04	14,7	1,23	17	49,3	81,11	73,32				
3	55	10	7,06	16,4	1,04	16	54,2	82,22	77,44				
4	55	15	7,07	19,8	0,83	11	60,1	87,77	82,00				
5	55	20	7,08	21,8	0,95	9	65,6	90,00	79,39				
6	55	25	7,09	23,4	0,82	6	69,8	93,33	82,21				