

# Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano

## Turbidity removal in a water sample from a natural source via coagulation/flocculation using plantain starch

## Remoção de turbidez em água de uma fonte natural utilizando a coagulação/floculação com amido de banana

Daniela Trujillo; Luisa Fernanda Duque; Juan Sebastián Arcila; Alejandro Rincón\*; Sebastián Pacheco; Oscar Fernando Herrera.

Programa de Ingeniería Ambiental. Universidad Católica de Manizales, Carrera 23 No 60-63, bloque E, Manizales, Colombia.  
\*arincons@ucm.edu.co

*Fecha Recepción: 18 de mayo de 2013*  
*Fecha Aceptación: 06 de mayo de 2014*

---

### Resumen

En este trabajo se analiza la remoción de turbiedad en agua proveniente de una fuente natural, mediante coagulación/floculación, usando almidón de plátano. Se planteó un diseño experimental factorial aleatorio de cuatro factores variables, a saber: pH, dosis de coagulante, velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta. Se realizaron pruebas de jarras para determinar los valores óptimos de dichos factores. El almidón de plátano muestra ser adecuado como ayuda de floculación, aunque se presentó una sedimentación lenta. La mejor eficiencia de remoción de turbiedad se obtuvo para los siguientes valores de los factores: pH de 5, 50:50 porcentaje en peso de la combinación sulfato de aluminio/almidón de plátano, velocidad de mezcla rápida de 150rpm, velocidad de mezcla lenta de 20rpm.

**Palabras clave:** *coagulación, tratamiento primario avanzado, polímero, sedimentación.*

### Abstract

This work presents the analysis of turbidity removal in water from a natural source, via coagulation/flocculation using plantain starch. A random factorial experimental design was formulated with four variable factors: pH, coagulant dose, rapid mixing speed and slow mixing speed. The jar test was carried out in order to determine the optimal values of such factors. The plantain starch is proper as flocculation aid, although its sedimentation is slow. The best turbidity removal corresponds to: pH of 5, a 50:50 weigh percent for the alum sulfate/plantain starch combination, fast mixing speed of 150rpm and slow mixing speed of 20rpm.

**Keywords:** *coagulation, advanced primary treatment, polymer, sedimentation.*

### Resumo

Neste trabalho se estuda a remoção da turbidez de água de uma fonte natural, utilizando a coagulação/floculação com amido de banana. Foi proposto um desenho experimental factorial aleatorio de quatro factores: pH, dose de coagulante, velocidade de mistura rápida e velocidade de mistura lenta. Foram realizados testes, "jar test", para determinar os valores ótimos de tais factores. O amido de banana mostra que é efetivo como apoio para floculação, não obstante a sedimentação foi lenta. A melhor eficiência de remoção de turbidez foi obtida para os seguintes valores: pH de 5, percentagem em massa de

mistura de sulfato de alumínio/ amido de banana de 50:50, velocidade de mistura rápida de 150rpm, e velocidade de mistura lenta de 20rpm.

**Palavras-chave:** coagulação, tratamento primário avançado, polímero, sedimentação.

## Introducción

En el tratamiento de agua residual o tratamiento por potabilización de agua para consumo doméstico, el uso de polielectrolitos en unión con coagulantes metálicos presenta grandes beneficios: i) se produce un floc cuya sedimentación es rápida, y ii) se puede reducir el gasto de coagulante, para el caso de ciertos tipos de aguas tratadas. Los polielectrolitos se pueden clasificar en sintéticos y naturales, cada uno de los cuales se discute a continuación: i) los polielectrolitos sintéticos son compuestos de tipo orgánico, obtenidos por vía química a partir de derivados del carbón y del petróleo, ii) los polielectrolitos naturales son polímeros generados por reacciones bioquímicas naturales, ya sea en plantas o animales, y pueden ser proteínas, carbohidratos y polisacáridos [1].

Actualmente, los polímeros sintéticos (polielectrolitos) son muy usados para coagulación y floculación en tratamiento de aguas residuales. Entre los polímeros más usados están la poliácridamida, el ácido poliácrico y varios polímeros catiónicos. Sin embargo, tienen las siguientes desventajas: i) su costo es elevado para los países de América Latina, teniendo en cuenta que debe ser importado, ii) su costo sufre incrementos debido al aumento de los costos de las reservas de petróleo, iii) tiene muy baja biodegradabilidad en suelo y en agua, y iv) los monómeros residuales tienen alto nivel de toxicidad [2,3,4]. De hecho, su elevado costo hace que su uso en América Latina sea limitado. En contraste, los polielectrolitos naturales son de bajo costo, su grado de toxicidad es bajo y tienen buena biodegradabilidad [1,2,3]. Así, se ha despertado un interés cada vez mayor en desarrollar floculantes que sean biodegradables y que sean basados en productos naturales. Algunos de estos son: almidón modificado, celulosa, y polisacáridos bacteriales [1,2,3].

El uso del almidón natural en combinación con coagulantes inorgánicos es una alternativa que permite disminuir el consumo de polímeros sintéticos utilizados como ayudantes de coagulación y floculación (polielectrolitos),

reduciendo así los costos en plantas de tratamiento de lixiviados o aguas residuales [4]. El almidón y sus derivados han demostrado ser muy útiles para floculación de partículas minerales ultrafinas y metales de hierro [5].

En el trabajo de Ortega [6], se propone una metodología de coagulación/floculación (CF) de lixiviados utilizando almidón de plátano. Esta metodología comprende: i) la modificación de almidón de plátano utilizando entrecruzamiento con trimetafosfato de sodio, ii) la CF con sulfato de aluminio y almidón modificado como ayudas de coagulación y floculación, respectivamente, iii) el análisis de diferentes mezclas de almidón modificado y sulfato de aluminio.

En el trabajo realizado por Laines [4] se estudió la remoción de materia orgánica presente en un lixiviado de un relleno sanitario mediante CF. Se evaluó la efectividad de cuatro mezclas distintas de almidón de plátano, sulfato de aluminio y arcillas. Se utilizó también sulfato de aluminio y cloruro férrico puros con el fin de comparar la efectividad de las cuatro mezclas. Se consideraron seis concentraciones diferentes de las mezclas, a saber: 75, 150, 225, 300, 375mg/L. Se realizó acidificación y neutralización del lixiviado como un pre-tratamiento anterior a la CF. Se realizó la prueba de jarras, y se midieron turbiedad, color, demanda química de oxígeno (DQO), pH, sólidos suspendidos totales (SST) y conductividad. La mejor remoción de turbiedad para dosis de 75mg/L se obtuvo con sulfato de aluminio, seguido por la mezcla LASA55, con porcentajes de remoción de 94 y 90%, respectivamente, donde la mezcla LASA55 corresponde a 50% de almidón de plátano, 50% de aluminio y 0 % de arcilla. La mejor remoción de color para dosis de 75mg/L se obtuvo con cloruro férrico, seguido por sulfato de aluminio y seguido por la mezcla LASA55, respectivamente, con porcentajes de remoción de 60, 44 y 42%, respectivamente. La mejor remoción de DQO se obtuvo con cloruro férrico y sulfato de aluminio, seguido por la mezcla LASAR 23530, donde la mezcla LASAR 23530 corresponde a 35% de almidón de plátano, 35% de aluminio, y 30% de arcilla. La remoción de DQO por las mezclas de

almidón fue pobre. La razón de esto se explica a continuación. Las mezclas basadas en almidón sólo remueven la fracción particulada de DQO y no la fracción disuelta. En contraste, el cloruro férrico y el sulfato de aluminio causan una oxidación química de la materia orgánica disuelta, al generar una reducción significativa del pH.

En el trabajo de Dogu y Arol [5] se considera la remoción de minerales de feldespato, mediante floculación usando almidón. Se usó almidón de maíz como floculante, y NaOH y HCl para ajustar el pH. La adsorción de almidón por el feldespato es menor que la adsorción por minerales color oscuro (DCM). La adsorción de almidón es óptima para pH en el rango 3-6. Se concluyó que los DCM tienen afinidad por el almidón, y pueden ser removidos por floculación con almidón.

En otro trabajo [7] se analizó la floculación de suspensiones de caolín mediante almidón modificado. Se usó un almidón modificado catiónicamente por un proceso de oxidación. Se usó poliacrilato de sodio de bajo peso molecular como agente dispersor que facilita la floculación. Se analizó la remoción de turbiedad, mediante un sensor de fibra óptica. Se analizó el efecto de la temperatura y la fuerza iónica. Se encontró lo siguiente: i) el almidón mostró ser efectivo como floculante en un rango de temperatura de 23 a 50°C, incluso en bajas concentraciones, ii) el almidón en general presentó menos efectividad cuando la suspensión de caolín era pretratada con poli acrilato de sodio, iii) el efecto de la temperatura sobre la floculación fue significativa solamente para algunas concentraciones de sal y de poliacrilato de sodio. Las mediciones de adsorción indicaron que el almidón utilizado lograba la floculación del caolín mediante un mecanismo de formación de puente.

En Colombia, el plátano que no está en buenas condiciones generalmente es desechado, de modo que puede usarse para procesos de CF. En este trabajo se considera una muestra de agua proveniente de una fuente natural de agua del Cerro de Oro de la ciudad de Manizales (Manizales, Colombia), cerca de la entrada a la planta de potabilización de agua de Niza. Considerando esta muestra de agua, se estudia la remoción de turbiedad mediante CF, usando almidón de plátano como ayuda de floculación. Se utiliza plátano de malas condiciones, de modo que no sirve para consumo humano, y que de otra forma sería desechado. Se pretende: i) analizar la eficiencia del almidón de plátano para el tratamiento de la

muestra de agua por CF, ii) comparar la eficiencia de distintas cantidades de sulfato de aluminio y almidón de plátano. El beneficio es estudiar la posibilidad de generar una disminución del uso de sulfato de aluminio.

En otros estudios [4] se menciona: i) la utilización de polímeros sintéticos y de coagulantes inorgánicos como sulfato de aluminio y cloruro férrico representan altos costos para los países en vías de desarrollo, como los países de América Latina, ii) la viabilidad de las mezclas naturales allí estudiadas implica la posibilidad de reducir la cantidad de coagulantes inorgánicos como sulfato de aluminio y cloruro férrico, y de polímeros sintéticos, iii) las mezclas naturales allí utilizadas son de bajo costo en comparación con los coagulantes inorgánicos como sulfato de aluminio y cloruro férrico, y de polímeros sintéticos. Además, en lo reportado por Guzmán LE, García R [8] se menciona: i) el empleo de materiales naturales puede reducir el uso de sales férricas y polímeros sintéticos, generando una reducción en los costos de tratamiento si se dispone de ellos a nivel local, ii) el empleo de polímeros naturales genera un menor volumen de lodos en comparación con el sulfato de aluminio. Por tanto, el presente trabajo tiene como beneficio dar un primer paso hacia la reducción del uso de coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio, lo cual a su vez es una posibilidad para lograr ahorro económico.

### Los polímeros

El almidón es un polímero natural. Los polímeros resultan de monómeros que se acoplan, dando lugar a un alto peso molecular en el intervalo  $10^4$  a  $10^6$ Da [9]. Los polímeros tienen diferente peso molecular, estructura, composición, y tipo de carga. La cantidad de carga depende de las características de la ionización de cada grupo funcional, la copolimerización y la sustitución de grupos en caso presentarse dicha sustitución.

Los polielectrolitos (polímeros) tienen tres tipos de acciones [4]: i) coagulación, causando una disminución de la carga de las partículas, que es el caso de los polielectrolitos catiónicos, ii) formación de puentes entre partículas, que es el caso de polímeros aniónicos y polímeros no iónicos, iii) coagulación-formación de puentes, que es el caso de polielectrolitos catiónicos de alto peso molecular. Los polímeros de alto peso molecular son efectivos para inducir floculación [9]. Estos polímeros forman colas que conectan varias partículas mediante puentes. Así, se

supera el efecto de las fuerzas de repulsión entre partículas cargadas negativamente [10]. Generalmente, la efectividad de la floculación mejora con el peso molecular del polímero, ya que esto implica la formación de flóculos más largos. Sin embargo, una concentración muy alta de polímero puede degradar la floculación porque en este caso cada molécula de polímero se pega sobre una sola partícula, de modo que no se forman los puentes [9].

Los polímeros disueltos generalmente tienen una alta viscosidad, de modo que se debe usar agitación mecánica para disolver el polímero en el agua. La intensidad del mezclado debe ser tal que se logre la dispersión, pero sin degradar los flóculos. La efectividad del polímero depende de su concentración, carga, peso molecular, pero también depende de las características del agua a tratar y los parámetros del proceso [9].

Los polímeros naturales se producen como resultado de reacciones bioquímicas ocurridas en plantas y animales. Los que muestran mayor efectividad y tienen mayor potencial para ser usados en plantas de tratamiento son: los almidones, los compuestos algínicos y los derivados de la tuna o nopal. Una gran ventaja de los polímeros naturales es su baja toxicidad. Los almidones tienen la desventaja de que a partir de ellos es difícil obtener compuestos solubles en agua [1]. Sin embargo, se han obtenido resultados favorables usando polímeros naturales sin utilizar modificación del almidón. Por ejemplo, algunas especies de cactus han sido utilizadas como coagulantes para tratamiento de aguas, como el *Opuntia* y el *Cactus latifaria*. Su preparación consiste de secado y pulverizado, sin utilizar ninguna modificación del almidón [11]. En otra ocasión se estudió la remoción de sólidos suspendidos y turbiedad, presente en lixiviados de un relleno sanitario de la ciudad de Tunja (Colombia), mediante coagulación floculación usando mucílago del cactus *Opuntia ficus* [12]. Se utilizaron dos métodos de tratamiento: coagulación/floculación y electrocoagulación. El mucílago del cactus se utilizó como agente coagulante. El mucílago se extrajo utilizando el siguiente método: maceración del parénquima con agua en medio ácido, medio neutro y medio básico; filtración y centrifugación. La eficiencia de los dos métodos de tratamiento se evaluó mediante la medición de la remoción de la turbidez del lixiviado. Se estudiaron los siguientes factores variables: proporción de mucílago a lixiviado, pH, y segmento de la celda electroquímica.

## El almidón

El almidón se puede obtener a partir de frutas y granos, por ejemplo el plátano y el arroz [6]. El principal componente del fruto de plátano es el almidón. El plátano en su etapa biche tiene un gran porcentaje de almidón, entre 60 y 70%, de modo que funciona como un excelente floculizante [4]. De acuerdo con el trabajo de Ortega [6], los componentes del plátano en orden de mayor a menor porcentaje son: almidón, humedad, fibra, lípidos, proteínas y cenizas.

El almidón es una mezcla de glucanos, ya que cada partícula insoluble de almidón involucra principalmente amilasa y amilopectina. El almidón se localiza en el interior de las células vegetales, formando partículas insolubles. La amilasa es un polímero lineal, mientras que la amilopectina es un polímero altamente ramificado [6]. En la literatura se mencionan algunos valores del contenido de amilosa y amilopectina en el almidón de plátano: i) en [6], se mencionan 11g de amilosa por 100g de almidón, y 89g de amilopectina por 100g de almidón, lo cual corresponde con la afirmación de que la amilopectina es el componente mayoritario del almidón [13], ii) en [14] se menciona que la amilopectina constituye aproximadamente 70-80% del almidón, iii) en [6] se menciona un dato de 42,4g de amilosa por cada 100g de almidón, iv) en [13] se menciona que cerca del 36,2% del almidón de plátano corresponde a amilosa, componente que le confiere características fisicoquímicas especiales como la tendencia a producir geles más firmes y claros.

De acuerdo con el trabajo de Ortega [6], el almidón en su forma nativa tiene propiedades gelificantes y espesantes, lo cual es muy útil para regular y estabilizar la textura en procesos de manufactura. En ocasiones, el plátano es desechado en procesos de manufactura por no cumplir normas y estándares de calidad. Sin embargo, las propiedades gelificantes y espesantes se pueden mejorar por modificación de la estructura química. En el trabajo de Ortega [6] se propone el uso de la técnica de entrecruzamiento con trimetafosfato de sodio, para la modificación del almidón de plátano. La adsorción del almidón mejora con valores bajos de pH. El almidón tiene carga negativa, y el pH bajo implica carga positiva de los sitios superficiales, favoreciendo la adsorción del almidón. A altos pH, los sitios superficiales tienen carga negativa, degradando la adsorción del almidón. Sin embargo, el almidón puede presentar afinidad específica hacia ciertos minerales, en

cuyo caso el efecto del pH es despreciable y se puede considerar un pH alto. Una concentración muy alta de almidón puede degradar la efectividad de la floculación. Esto se debe a que en este caso el almidón cubre completamente las superficies de las partículas previniendo la formación de puentes entre ellas [5].

### **El proceso de coagulación/floculación**

El proceso de coagulación/floculación (CF) se usa generalmente para remover sólidos suspendidos del agua, ya sea agua que se someterá a proceso de potabilización o agua residual. Las ayudas de coagulación/floculación más comunes son: alumbre, cloruro férrico y polímeros de cadena larga [9, 15, 16]. La coagulación consiste en reducir la carga eléctrica de las partículas suspendidas. Las partículas de aguas residuales generalmente están cargadas negativamente. Las cargas eléctricas similares generan fuerzas de repulsión que promueven la suspensión de las partículas. El proceso de coagulación reduce la carga negativa, contribuyendo a la agregación de partículas para formar microfloculos. La floculación consiste en la agregación de partículas para formar flóculos más grandes. La sedimentación comprende la precipitación de sólidos, incluyendo los sólidos debidos a la contaminación y los sólidos generados por los químicos. La floculación depende de la temperatura y el pH del agua [16]. El proceso de CF involucra los siguientes pasos [9, 17]:

**Si) Mezclado rápido.** También llamado mezclado flash, en el cual las ayudas de coagulación y floculación y las sustancias de ajuste de pH son añadidos a la muestra de agua, y se efectúa mezclado rápido. El objetivo es dispersar los químicos en el agua, reducir las fuerzas repulsivas entre las partículas, es decir permitir la coagulación.

**Sii) Mezclado lento.** El mezclado se efectúa a velocidad moderada. El objetivo es mantener los componentes de agua mezclados y promover la formación de flóculos largos, es decir floculación.

**Siii) Sedimentación.** El mezclado es suspendido, para promover la precipitación del flóculos.

Las sales metálicas han sido convencionalmente usadas como ayudas de coagulación. Las principales desventajas son: i) estas sales reducen la alcalinidad del agua, ii) estas sales pueden reducir el pH del agua resultante, iii) las

características de precipitación pueden ser pobres, iv) se puede producir una gran cantidad de lodos. La efectividad del proceso de CF depende de los siguientes factores [9, 18]: i) características y dosis de las ayudas de coagulación y floculación, ii) si se usa un polímero, hay influencia de la concentración del polímero, la carga (aniónica, catiónica y no iónica), el peso molecular y la densidad de carga, iii) pH, iv) velocidad y tiempo de mezclado lento y rápido, v) temperatura, vi) características físicas y químicas de la muestra de agua a estudiar. Una alta cantidad de coagulante puede generar la inversión de la carga, y por tanto un bajo nivel de remoción de carga orgánica y un alto nivel de turbiedad residual [15, 19]. La optimización de los factores i, ii, iii y iv genera una mejora significativa de la efectividad del proceso.

La meta de una prueba de jarras básica es establecer los parámetros de proceso que dan lugar a un desempeño óptimo del proceso de CF. Los parámetros del proceso son [20]: i) dosis de ayudas de coagulación y floculación, ii) intensidad y tiempo de mezcla rápida y lenta, iii) valor del consumo de productos químicos correspondiente a la intensidad y tiempo de mezcla óptimos, iv) relación entre dosis utilizada de productos químicos y eficiencia de remoción. La prueba de jarras involucra los pasos Si, Sii y Siii, mencionados anteriormente.

Se hacen las siguientes recomendaciones para una alta efectividad de la CF [15, 20]: i) adicionar los componentes químicos en lugares de la jarra donde haya mezcla intensa, para obtener una buena dispersión de estos, ii) en el caso que se agrega una sal como  $\text{FeCl}_3$ , esta debe agregarse antes de agregar el polímero, iii) la intensidad y duración de la mezcla deben ser tales que los productos químicos agregados se distribuyan y mezclen completamente, pero de forma que los microfloculos no se rompan. Incluso, en el trabajo de Gómez [15] se recomienda aplicar el coagulante a nivel de la paleta agitadora, en la zona de turbulencia y no sobre la superficie del agua.

### **La turbiedad y el pH**

La turbiedad mide el nivel de transmitancia de luz en el agua, y sirve como una medida de la calidad del agua en relación a materia suspendida coloidal y residual [19, 21]. En términos generales, no hay relación entre turbidez y concentración de sólidos suspendidos. La turbiedad varía de acuerdo a: i) la fuente de luz y el método de medición, ii) las



propiedades de absorción de luz del material suspendido. Esto hace que se deba tener mucho cuidado al comparar valores de turbiedad de distintas referencias de la literatura. Sin embargo, en un mismo proceso o sistema los valores de turbiedad permiten analizarlo y controlarlo. En Colombia, generalmente se usa el método nefelométrico-2130 para medir la turbiedad, el cual se encuentra reportado en [22]. Este método permite comparar valores de distintas referencias de la literatura siempre y cuando se aplique con rigurosidad.

La materia suspendida genera los siguientes efectos en las aguas [23]: i) se deposita en los lechos de los ríos, ii) cubre el fondo de los ríos, de modo que afecta la reproducción de los peces, o afecta la cadena alimentaria de los mismos, iii) si la materia suspendida es materia orgánica, ésta sufre descomposición y flota sobre el agua, iv) los sólidos suspendidos pueden generar depósitos de lodos y situación anaerobia. La turbiedad junto con el color y el olor afectan la estética del agua, de modo que la hacen inaceptable para uso público. El pH inicial de la muestra a tratar afecta significativamente la coagulación, y generalmente hay un rango de pH óptimo que varía según la muestra de agua estudiada y los reactivos utilizados [1]. El pH apropiado para los procesos de tratamiento generalmente está en el rango de 6,5 a 8,5 [23]. En el caso de valores de pH por debajo del rango de pH óptimo, se puede utilizar cal o hidróxido de sodio para aumentarlo [6]. Si la coagulación se lleva a cabo fuera del rango de pH óptimo, es necesario aumentar la cantidad de coagulante. Se debe tener en cuenta que el pH de la muestra a tratar se afecta de acuerdo al tipo y cantidad de los coagulantes y ayudantes de coagulación utilizados.

### **Lineamientos del reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico -RAS 2000**

En el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico -RAS 2000 [24], se menciona que se debe realizar un estudio previo de prueba de jarras con el fin de determinar cuál es el coagulante o los coagulantes y los auxiliares de coagulación adecuados, las dosis óptimas de los mismos, y las condiciones de operación, de tal forma que se obtenga una buena calidad del agua. Entre las condiciones de operación a ser determinadas están el tiempo y el gradiente óptimo de coagulación y de floculación.

Además, se menciona que la prueba de jarras debe de realizarse de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 3903. Los coagulantes y auxiliares de coagulación que pueden usarse en estas pruebas son igualmente mencionados. En caso de emplear productos químicos distintos a los mencionados en el documento RAS-2000, se debe solicitar permiso al Ministerio de Salud para su aplicación.

**Coagulación.** La mezcla rápida debe generar fuerte turbulencia, de modo que haya dispersión rápida y homogénea de los coagulantes en el tiempo requerido. Como coagulantes pueden emplearse sales de aluminio, por ejemplo sulfato de aluminio. Si en los ensayos de laboratorio se observa que es adecuado utilizar insumos auxiliares para mejorar la eficiencia de la coagulación o de la floculación, estos pueden ser adicionados. De hecho, deben emplearse insumos auxiliares para llevar el pH a valores que correspondan a coagulación óptima. Los coagulantes y auxiliares de coagulación y floculación se deben aplicar en el punto de mayor turbulencia, verificando que se dispersen de manera uniforme en todo el volumen de agua.

**Floculación.** La agitación no debe ser muy rápida porque genera el rompimiento de los flóculos, ni muy lenta porque favorece la sedimentación durante el proceso de floculación. Algunos elementos a verificar en la floculación son: i) garantizar que el tiempo de floculación sea suficiente para que los flóculos alcancen el tamaño apropiado, ii) verificar que la dosis de insumos y sustancias de coagulación y floculación sean adecuados de tal forma que se genere un flóculo estable y de adecuado tamaño. Se debe verificar la eficiencia de remoción de turbiedad y la formación de un flóculo estable.

### **Metodología o parte experimental**

En el presente trabajo se realiza un estudio por prueba de jarras para tratar una muestra de agua tomada de una fuente natural de agua del sector El Cerro de Oro de la ciudad de Manizales (Colombia), cerca de la entrada a la planta de potabilización de agua de Niza. Se utiliza almidón de plátano como ayuda de floculación. El almidón de plátano considerado en el presente trabajo cumple con el lineamiento que establece que el producto auxiliar no debe tener efectos nocivos sobre la calidad del agua tratada, siendo dicho lineamiento

mencionado en la sección de Introducción. Se consideran como factores variables el pH, la dosis de coagulante, la velocidad de mezcla lenta y la velocidad de mezcla rápida. Este estudio es útil para procesos de potabilización de agua, con el fin de disminuir el uso de sales metálicas como el sulfato de aluminio, lo cual implica la posibilidad de obtener ahorro económico.

Según el artículo 9 'Usos del agua' del Capítulo IV del Decreto 3930 se tiene en cuenta el uso del aguas superficiales para consumo humano y doméstico [25]. Los estudios previos para proceso de CF se realizan por pruebas de jarras [24]. Entre los coagulantes y productos auxiliares que pueden usarse para potabilización, se incluyen los coagulantes metálicos como el sulfato de aluminio. Además, debe adicionarse un producto auxiliar de la coagulación o de la floculación, si en previos ensayos se ha encontrado que su uso es conveniente. Dicho producto auxiliar no debe tener efectos nocivos sobre la calidad física, química o biológica del agua tratada [24]. El almidón de plátano considerado en el presente trabajo cumple dicho lineamiento.

### Diseño del experimento

El número de variables a evaluar y la complejidad del proceso de CFS, es la razón por la cual los procedimientos convencionales de CFS tienen un consumo significativo de tiempo, y un número relativamente alto de experimentos, como se puede concluir del trabajo de Suarez y el de Laines [4,20]. En contraste, las metodologías estadísticas permiten definir los factores variables que tienen una mayor influencia en la variable de respuesta, con las siguientes ventajas [26,27]: i) permiten entender las interacciones entre las variables, ii) permiten reducir el número total de experimentos, ahorrando esfuerzo y tiempo, ahorrando gasto de insumos y componentes químicos, ahorrando utilización de materiales y equipos, y ahorrando fuerza de trabajo. Hay varios estudios de remoción de contaminantes en agua, en los cuales se han utilizado diseño factorial en lugar del método de variación de un solo factor, por ejemplo el trabajo de Dávila [28] y el trabajo de González [29]. De hecho, el trabajo de Dávila [28] es sobre coagulación, para remoción de sólidos totales en vinazas provenientes de una destilería de alcohol. Así, el presente trabajo pretende identificar la influencia de cuatro factores variables sobre la remoción de turbiedad, no como una prueba definitiva de determinación de los valores óptimos,

sino como un primer estudio que permitiría un posterior estudio riguroso de prueba de jarras que forma parte del trabajo futuro. En dicho estudio futuro, los ensayos serían en menor número y consideraría como variables los factores más relevantes, ya que partiría de las conclusiones obtenidas en el presente trabajo. El presente trabajo permite identificar: i) las interacciones entre los factores variables, ii) los factores variables con mayor efecto en remoción de turbiedad, iii) rangos de valores de los factores variables.

Se utiliza un diseño experimental factorial  $2^k$  que permite identificar los valores óptimos de los parámetros a analizar [30]. Las variables se definen de la siguiente forma:

**Factores variables:** pH, dosis de coagulante, velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta. La dosis de coagulante se refiere al porcentaje en peso de la mezcla de sulfato de aluminio y almidón de plátano.

**Variables de respuesta:** turbiedad en NTU.

**Factores constantes:** tipo de agua, tipo de coagulante, tiempo de mezcla rápida, tiempo de mezcla lenta, tiempo de sedimentación.

Se utilizará agua con una misma turbiedad para todos los experimentos, dado que el tipo de agua no es un factor variable sino un factor constante. Dado que los factores variables son cuatro, el diseño factorial implica  $2^4 = 16$  experimentos. Los cuatro factores variables mencionados anteriormente se identificaron con las letras A, B, C, D y se definió un valor máximo y un valor mínimo para cada uno de ellos, como se muestra en la Tabla 1.

Para la definición del valor máximo y el valor mínimo de cada factor variable, que se muestran en la Tabla 1, se realiza un análisis de los valores encontrados en la literatura, como se muestra a continuación. Con respecto a la velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta, a partir de [4,12,17,19,20] se puede concluir que la velocidad de mezcla rápida generalmente está en el rango 75-300rpm, mientras que la velocidad de mezcla lenta generalmente está en el rango 10-40rpm. Así, partiendo de estos rangos, en el presente trabajo se definieron los valores 100rpm y 150rpm como valores máximos y mínimos, respectivamente, de velocidad de mezcla rápida, y los valores 20rpm y 50rpm como valores máximos y mínimos, respectivamente, de velocidad de

mezcla lenta (Tabla 1). Con respecto al pH, en [14] se reporta la utilización de valores en el rango 6-8 para el pH inicial de la muestra de agua a tratar, en pruebas de FCS usando almidón, mientras que en [5], se utilizan valores de pH en el rango 4-12. Así, a partir de estos valores, en el presente trabajo se definieron valores de pH de 5 y 7 como valores máximo y mínimo de pH, respectivamente, (Tabla 1). Con respecto a las proporciones de insumos de coagulación y floculación, en [4] se definen las

proporciones para las mezclas de coagulantes con almidón de plátano y arcilla, y para el caso de mezclas sin arcilla se definen las siguientes proporciones: i) 50% de sulfato de aluminio con 50% de almidón de plátano, ii) 30% de sulfato de aluminio con 70% de almidón de plátano. Así, en el presente trabajo se definieron unas proporciones muy similares: i) 50% de sulfato de aluminio con 50% almidón de plátano, ii) 20% de sulfato de aluminio con 80% de almidón de plátano (Tabla 1).

**Tabla 1.** Valores máximo y mínimo de los factores variables del proceso de coagulación/floculación.

Factor variable	Valor mínimo	Valor máximo
A pH	5	7
B dosis de coagulante (porcentaje en peso de sulfato de aluminio y almidón de plátano)	50-50%	20 - 80%
C Velocidad de mezcla rápida	100rpm	150rpm
D velocidad de mezcla lenta	20rpm	50rpm

Los porcentajes para el factor B corresponden al porcentaje en peso de la combinación sulfato de aluminio/almidón de plátano, respectivamente.

Como se discutió anteriormente y por las razones mencionadas, se utilizará un diseño basado en la estadística en lugar del diseño convencional de prueba de jarras. De acuerdo con el diseño del experimento, se deben realizar 16 ensayos o pruebas distintas, lo que corresponde a 16 condiciones operacionales distintas de coagulación/floculación. Para lograr estos 16 ensayos, se planea la realización de 8 corridas de la prueba de jarras, cada corrida involucrando dos beakers, que corresponden al valor máximo y mínimo, respectivamente. Además, se planea la realización de cada corrida por duplicado para disminuir el error de medición, lo cual implica 32 ensayos distintos, que corresponden a 16 corridas de la prueba de jarras.

#### **Obtención del almidón de plátano**

En [6] se utiliza plátano proveniente de la manufactura de la empresa 'Las Mirandas', de México, se utiliza plátano que es desechado por no cumplir las normas y estándares de calidad, aunque no se menciona el grado de madurez.

Se reporta el siguiente procedimiento para la extracción del almidón de plátano: i) preparación de la muestra: comprende el pesado, lavado y macerado de las muestras de plátano, ii) separación de la muestra, que comprende el filtrado, separación y centrifugación, iii) extracción de la muestra, que comprende el secado, pulverizado y envasado. Dicho procedimiento se muestra en la Figura 1.

En el presente trabajo, para la obtención del almidón de plátano se utilizaron los siguientes equipos y materiales: un horno, una nevera, una licuadora, un cuchillo, papel tamiz y plátano verde. Se utilizaron 2kg de plátano verde recolectado en la plaza de mercado de la ciudad de Manizales (Colombia). Este plátano fue llevado al Laboratorio Calidad de Aguas de la Universidad Católica de Manizales, donde fue preparado para la prueba de jarras. Cada plátano fue cortado en trozos iguales, incorporado en agua al fuego, durante 45 minutos, hasta ebullición. Luego fue licuado y pasado por el papel tamiz, para absorber el agua. La pasta fue llevada al horno durante 24 horas.





**Figura 1.** Procedimiento general para la obtención de almidón de plátano, tomado de [6].

### Preparación del sulfato de aluminio líquido

Para preparar el sulfato de aluminio líquido se utilizó sulfato de aluminio granulado tipo B. Fue necesario calcular el volumen con base en la densidad:  $V=m/\rho$ . Después de haber calculado el volumen se aforó con 100ml de agua destilada en un balón volumétrico.

### Obtención de la muestra de agua

Se recolectó agua proveniente de una fuente natural de agua en el sector del Cerro de Oro de la ciudad de Manizales (Colombia), cerca de la entrada a la planta de potabilización de agua de Niza, siendo dicha planta operada por la empresa Aguas de Manizales. Se midieron parámetros iniciales de turbiedad y pH. Dado que la turbiedad presente en el agua tomada de la fuente natural de agua era muy baja, fue necesario añadir arcilla y arena con el fin de aumentar la turbiedad. Este hecho implica que no se está utilizando el agua con su nivel original de contaminación, pero permite evaluar el efecto del almidón de plátano en la remoción de turbiedad. Luego de la adición de

arcilla y arena se realizó nuevamente una medición inicial de pH y turbiedad. Las características del agua son: i) para el caso de experimentos a ser realizados con sulfato de aluminio granulado, el agua presentó los siguientes valores: pH inicial: 7,89, turbiedad inicial: 360 NTU, siendo esta turbiedad de nivel medio, y ii) para el caso de los experimentos a ser realizados con sulfato de aluminio líquido, el agua presentó los siguientes valores: pH inicial: 8, turbiedad inicial: 369 NTU. Dichos valores de turbiedad corresponden a agua con turbiedad media.

### Realización de la prueba de jarras

En este trabajo se desarrolla la prueba de jarras, utilizando almidón de plátano como ayuda de floculación. El objeto es determinar la influencia de cuatro factores variables mostrados en la Tabla 1 sobre la remoción de turbiedad, no como una prueba definitiva de determinación de los valores óptimos, sino como un primer estudio que permitiría un posterior estudio riguroso de prueba de jarras que forma parte del trabajo futuro. En dicho futuro estudio riguroso, los ensayos serían en menor número y serían en las variables más relevantes, ya que partiría de las conclusiones obtenidas en el presente trabajo. El presente trabajo permite identificar: i) las interacciones entre los factores variables, ii) los factores variables con mayor efecto en remoción de turbiedad, iii) rangos de valores de los factores variables.

El beneficio es generar una disminución del uso de sulfato de aluminio, lo cual implicaría la posibilidad de obtener ahorro económico. El método de prueba de jarras se encuentra ampliamente explicado en el trabajo de Suarez y Navia [20], pero también se encuentra en Arboleda [1] y Ebeling [17]. Se tienen en cuenta los lineamientos del Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico -RAS 2000 mencionados en la sección de Introducción. Los equipos y materiales utilizados son: Un equipo de jarras de seis puestos E&Q, 6 beakers de 2000ml marca Schott, turbidímetro Turbiquant 1100 Merck, pHmetro Metrohm 827, pipeteadores y pipetas Brand, balanza analítica Ohaus y balones volumétricos Schott. Los reactivos, químicos e ingredientes utilizados son: sulfato de aluminio granulado, sulfato de aluminio líquido al 1%, agua destilada, almidón de plátano, NaOH, ácido sulfúrico. El sulfato de aluminio granulado es tipo B, y el sulfato de aluminio líquido fue preparado con base en sulfato de aluminio granulado tipo B.

La experimentación se realizó en el laboratorio de Calidad de Aguas de la Universidad Católica de Manizales, durante dos días, como se explica a continuación. Se realizaron 16 experimentos el primer día y otros 16 experimentos el segundo día, con sulfato de aluminio como coagulante y almidón de plátano como ayudante de floculación. El primer día se utilizó sulfato de aluminio granulado, mientras que el segundo día se utilizó sulfato de aluminio líquido.

Para cada prueba de jarras, la concentración de sulfato de aluminio y almidón de plátano, el pH, los gradientes de velocidad rápida y lenta, se definieron de acuerdo al diseño factorial aleatorio  $2^k$  con réplica. La definición de estos parámetros está dada por las columnas A, B, C y D de la Tabla 2: el número 1 indica el máximo de cada variable y se obtienen de la tercera columna de la Tabla 1, mientras que el número -1 indica el valor mínimo de cada variable y se obtienen de la segunda columna de la Tabla 1.

El pH se modifica con NaOH o ácido, hasta obtener el valor máximo o mínimo de pH, de acuerdo con la Tabla 1. Se vierte un litro de agua problema en cada beaker. La medición de las cantidades de sulfato de aluminio y almidón de plátano fueron medidos mediante una balanza, de tal forma que se obtuvieran los porcentajes definidos en el diseño del experimento.

Se inicia la operación del agitador múltiple, con una velocidad de agitación rápida, y se agrega la combinación prevista de sulfato de aluminio con almidón de plátano. Cuando se alcanza el tiempo de mezclado rápido, que es de un minuto, la velocidad del agitador se reduce al valor de mezclado lento. Cuando se alcanza el tiempo de mezclado lento, la operación del agitador es detenida, para favorecer la precipitación de los flóculos. Cuando se completa el tiempo de sedimentación, es decir 20min, se mide nuevamente la turbiedad. Se realiza una réplica a cada experimento.

**Tabla 2.** Orden de las corridas, configuración de las corridas, y resultados de las mediciones de turbiedad para el caso de sulfato de aluminio líquido, para la primera y la segunda réplica.

Orden estandar	Orden de corrida	A	B	C	D	Réplicas: turbiedad	
						I	II
1	15	-1	-1	-1	-1	20,50	20,54
2	12	1	-1	-1	-1	21,61	21,61
3	2	-1	1	-1	-1	20,50	20,54
4	6	1	1	-1	-1	21,61	21,61
5	7	-1	-1	1	-1	23,12	23,15
6	9	1	-1	1	-1	34,04	31,00
7	5	-1	1	1	-1	33,18	33,18
8	16	1	1	1	-1	9,02	15,37
9	1	-1	-1	-1	1	3,90	4,09
10	3	1	-1	-1	1	17,34	15,31
11	10	-1	1	-1	1	15,92	19,78
12	14	1	1	-1	1	25,17	27,62
13	8	-1	-1	1	1	5,57	7,33
14	11	1	-1	1	1	11,87	15,27
15	13	-1	1	1	1	4,30	4,30
16	4	1	1	1	1	15,95	19,88

## Resultados y Discusión

### Resultados de la prueba de jarras

Según observaciones visuales, el almidón de plátano demora mucho tiempo en sedimentarse. Sin embargo, muestra capacidad de servir como coadyuvante de floculación. Los datos obtenidos de los experimentos para el caso de sulfato de aluminio granulado, no fueron adecuados para el análisis estadístico puesto que en la tabla de factores relevantes no era clara la diferenciación del orden de relevancia o influencia que tenían los factores variables sobre la turbiedad. Este comportamiento está en concordancia con las recomendaciones hechas por Arboleda J [1]: los floculantes y coagulantes, así como las ayudas de floculación deben de diluirse antes de añadirse al proceso para mejorar la eficiencia de éste. A pesar de la existencia de esta recomendación, se decidió utilizar sulfato de aluminio granulado con el fin de evaluar su efecto. En contraste, los datos para el caso de sulfato de aluminio líquido sí dieron lugar a factores relevantes, y por tanto son considerados en el análisis estadístico.

Con respecto al sulfato de aluminio líquido, hubo una disminución considerable de la turbiedad. La turbiedad inicial para el caso del sulfato de aluminio líquido fue de 369 NTU y el pH inicial fue de 8.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de turbiedad, para cada una de las dos réplicas. Como se explicó en la Tabla 1, los factores variados son: A pH; B dosis de coagulante; C velocidad de mezcla rápida; D velocidad de mezcla lenta. En las columnas A, B, C y D el número 1 indica el valor máximo de cada variable, y se obtienen de la

tercera columna de la Tabla 1, mientras que el número -1 indica el valor mínimo de cada variable, y se obtiene de la segunda columna de la Tabla 1. La corrida que presentó menor remoción de turbiedad fue la número seis (6), que corresponde a la siguiente configuración de los factores A, B, C y D: máximo (+1), mínimo (-1), máximo (+1) y mínimo (-1). Con base en la Tabla 1 concluimos que dicha configuración corresponde a los siguientes datos: pH máximo, es decir de 7; dosis de coagulante mínima, es decir de 50:50 en peso de sulfato de aluminio y almidón de plátano; velocidad de mezcla rápida máxima, es decir de 150rpm; velocidad de mezcla lenta mínima, es decir de 20rpm. Véase la Tabla 1 para los valores máximo (+1) y mínimo (-1).

La corrida que presentó mayor remoción de turbiedad fue la número nueve (9), que corresponde a la siguiente configuración de los factores A, B, C y D: mínimo (-1), mínimo (-1), mínimo (-1) y máximo (+1), respectivamente. Con base en la Tabla 1 concluimos que dicha configuración corresponde a los siguientes datos: pH mínimo, es decir de 5; dosis de coagulante mínima, es decir 50:50 en peso de sulfato de aluminio y almidón de plátano; velocidad de mezcla rápida mínima, es decir de 100rpm; velocidad de mezcla lenta máxima, es decir 50rpm. En la Tabla 3 se presentan con mayor claridad los datos de dichas corridas. Entre paréntesis se expresa el índice (-1) o (+1), que indica que se toma el valor mínimo del factor variable en el caso de (-1), o se toma el valor máximo del factor variable en el caso de (+1), con base en la Tabla 1.

**Tabla 3.** Datos de las corridas con menor y mayor remoción de turbiedad.

Factor variable o característica	Valores para corrida con menor remoción de turbiedad	Valores para corrida con mayor remoción de turbiedad
A pH	(+1) 7	(-1) 5
B dosis de coagulante, % peso de sulfato de aluminio y almidón de plátano	(-1) 50:50	(-1) 50:50
C velocidad de mezcla rápida	(+1) 150rpm	(-1) 100rpm
D velocidad de mezcla lenta	(-1) 20rpm	(+1) 50rpm
Número de la corrida	6	9
Turbiedad obtenida	34,04 y 31,00	3,90 y 4,09

**Análisis estadístico**

Los datos fueron sometidos a las pruebas para corroborar los supuestos de Normalidad, Homocedasticidad e Independencia, y posteriormente se realizó el análisis de varianza y la prueba de Pareto (ver Montgomery D [30]).

A continuación se mostrará los resultados obtenidos.

**Prueba de normalidad**

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la prueba de normalidad.

**Tabla 4.** Pruebas de normalidad.

Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
Estadístico	GL	p-Valor	Estadístico	GL	p-Valor
0,132	32	0,168	0,941	32	0,082

El superíndice a indica la corrección de la significación de Lilliefors.

De acuerdo a las Hipótesis a contrastar (Montgomery D [30]):

$H_0$ : Los datos analizados siguen una distribución Normal.

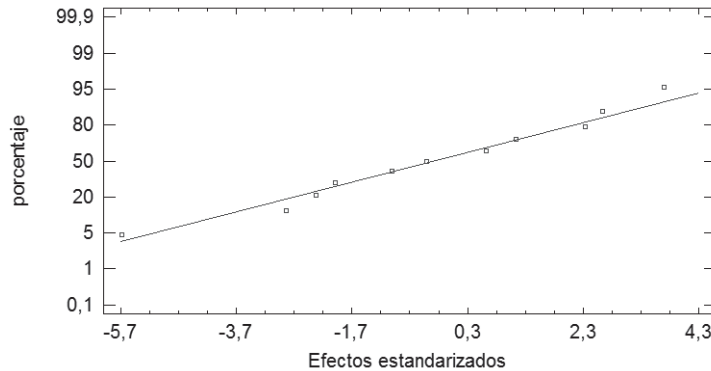
$H_1$ : Los datos analizados no siguen una distribución Normal

Analizando los p-valores de las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk los valores obtenidos son mayores al nivel de significancia de la prueba estadística  $\alpha=0,05$ , lo cual indica un

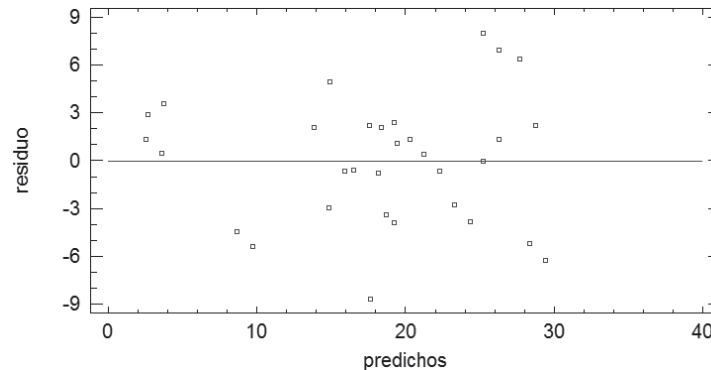
aceptación de la hipótesis nula  $H_0$ , lo que conlleva a la aceptación de que los datos siguen una distribución normal. Esta aseveración se corrobora con la Figura 2, donde se observan que los datos siguen una tendencia a línea recta.

**Prueba de homocedasticidad**

De acuerdo a la Figura 3, la cual representa la dispersión de los residuales, se observa que los datos no presentan ninguna tendencia extraña o algún patrón de distribución, por esta razón se puede concluir que los datos cumplen con el supuesto de Homocedasticidad (ver Montgomery D [30]).



**Figura 2.** Gráfico de probabilidad normal para turbiedad.



**Figura 3.** Gráfica de residuos para turbiedad.

### Supuesto de independencia

Para probar el análisis de autocorrelación de las variables, se implementó el método de Durbin-Watson. El p-valor obtenido fue de 0,9011, esto indica que bajo un nivel de significancia  $\alpha=0,05$  no existe auto-correlación serial en los residuales. Esto indica la independencia entre los datos analizados (Montgomery D [30]).

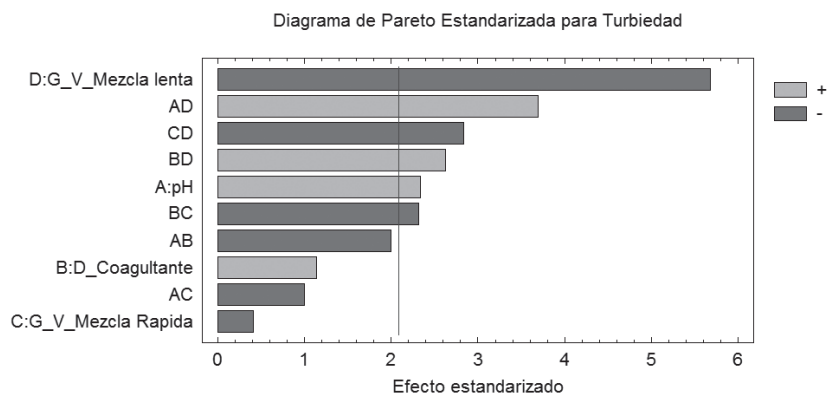
### Análisis de Varianza y pruebas de Pareto

Después de realizar la comprobación de los supuestos, se continúa con el análisis del diseño experimental  $2^k$ . A continuación se presentan los resultados de la ANOVA en la Tabla 5 y el diagrama de Pareto en la Figura 4, para el diseño  $2^4$  replicado (Montgomery D [30]).

**Tabla 5.** Análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	130,089	1	130,089	5,44	0,0302
B:D_Coagultante	31,1018	1	31,1018	1,30	0,2674
C:G_V_Mezcla Rápida	3,96472	1	3,96472	0,17	0,6881
D:G_V_Mezcla lenta	771,434	1	771,434	32,28	0,0000
AB	95,1504	1	95,1504	3,98	0,0598
AC	24,0082	1	24,0082	1,00	0,3281
AD	326,253	1	326,253	13,65	0,0014
BC	128,584	1	128,584	5,38	0,0310
BD	164,988	1	164,988	6,90	0,0161
CD	191,672	1	191,672	8,02	0,0103
bloques	9,14014	1	9,14014	0,38	0,5432
Error total	477,896	20	23,8948		
Total (corr.)	2354,28	31			

Los factores variados son: A: pH; B: dosis de coagulante; C: velocidad de mezcla rápida; D: velocidad de mezcla lenta.



Los factores variados son: A: pH; B: dosis de coagulante; C: velocidad de mezcla rápida; D: velocidad de mezcla lenta.

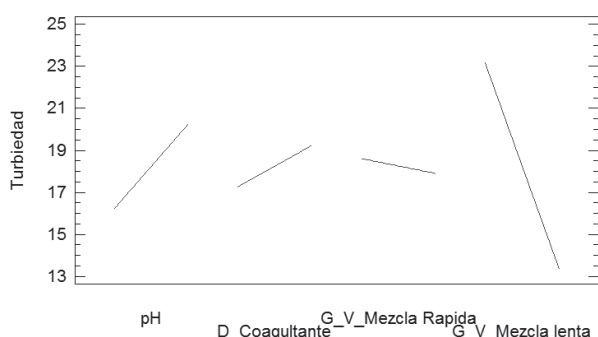
**Figura 4.** Diagrama de Pareto estandarizada para turbiedad.

De acuerdo con los resultados mostrados en la gráfica de Pareto y la ANOVA, los factores principales relevantes para el análisis fueron el pH y el gradiente de velocidad para mezcla lenta. Además de esto se observa que el gradiente de mezcla lenta se presenta como factor relevante al interactuar con la dosis de coagulante, los gradientes de mezcla rápida y el pH. Esto concuerda con la literatura, pues

en la referencia Arboleda J. [1] se expresa que el pH y el gradiente de velocidad son variables de un efecto significativo en la prueba de jarras. Por otra parte la interacción de la dosis de coagulante y el gradiente de mezcla rápida se ubica como una interacción relevante pero con un menor peso respecto a las demás interacciones en las que está incluida el gradiente de mezcla lenta.



En la Figura 5, correspondiente a los factores principales, se observa que el factor más relevante que produce cambios radicales en la turbiedad es el gradiente de mezcla lenta, encontrando que se encuentran bajas turbiedades en altos valores del gradiente de mezcla lenta, lo cual es coherente con lo observando en la ANOVA en la Tabla 5, cuyo cuadrado medio es el más alto comparado con los cuadrados medios de los demás factores e interacción analizados en la ANOVA. Esto tiene coherencia con la literatura, pues en el libro de Arboleda [1] se considera al gradiente como un factor que tiene influencia significativa sobre la prueba de jarras.



**Figura 5.** Gráfica de efectos principales para turbiedad.

El hecho de que la menor turbiedad se presente para valor bajo de pH, es decir pH de 5, es coherente con la literatura, pues en el trabajo

de Dogu y Arol [5] se concluyó que la adsorción del almidón es óptima para pH en el rango 3-6, y mejoraba a medida que se tomaban valores de pH menores, y la mejor adsorción se presentó para pH 3.

La Tabla 6 muestra el orden de influencia de las interacciones binarias sobre la turbiedad, y la magnitud del cambio en la turbiedad por efecto de las diferentes interacciones. La tabla se obtuvo con base en los valores de cuadrados medios mostrados en el análisis de varianza (ver Tabla 5), y la Figura 6 de interacciones. Como se explicó en la Tabla 1, los factores variados son: A pH; B dosis de coagulante; C velocidad de mezcla rápida; D velocidad de mezcla lenta.

La interacción que mayor tiene influencia en la turbiedad es la interacción AD que corresponde a pH con velocidad de mezcla lenta: las variaciones en estos factores genera las mayores variaciones en la turbiedad, en comparación con las demás interacciones. De hecho, genera variaciones de 10 unidades en la turbiedad al variar el pH. Se obtuvo una menor turbiedad con valor bajo de pH 5, y un valor alto de velocidad de mezcla lenta de 50rpm.

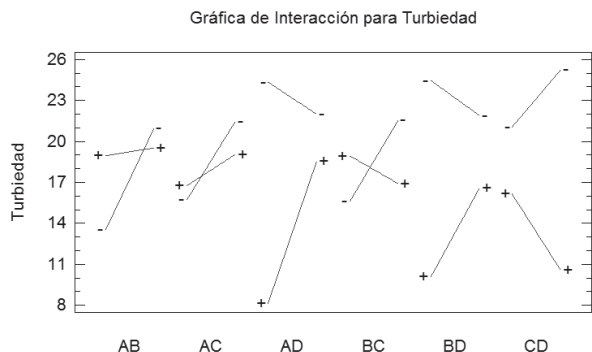
La interacción que ocupa el segundo puesto es la interacción entre velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta. La velocidad de mezcla rápida está relacionada con la dispersión de los insumos en el agua a ser tratada.

**Tabla 6.** Orden de importancia de las interacciones binarias sobre la turbiedad.

Interacción	Valor de cuadrado medio	Magnitud del cambio en la turbiedad generado por el aumento de la primera variable de la interacción
AD: pH/velocidad de mezcla lenta	326,253	+10 (para valor alto de la velocidad mezcla lenta) y -2,3 (para valor bajo de la velocidad de mezcla lenta)
CD: velocidad de mezcla rápida/velocidad de mezcla lenta	191,672	-5,5 (para valor alto de la velocidad de mezcla lenta) y +4,4(para valor bajo de la velocidad de mezcla lenta).
BD: dosis de coagulante/ velocidad de mezcla lenta	164,988	+6,5(para valor alto de la velocidad de mezcla lenta) y -2,5 (para valor bajo de la velocidad de mezcla lenta).
BC: dosis de coagulante/ velocidad de mezcla rápida	128,584	+6,0(para valor bajo de la velocidad de mezcla rápida) y -2,2(para valor alto de velocidad de mezcla rápida)
AB: pH/dosis de coagulante	95,1504	+7,5 (para valor bajo de dosis de coagulante) y -0,5 (para valor alto de dosis de coagulante)
AC: pH/velocidad de mezcla rápida.	24,0082	+5,6 (para valor bajo de velocidad de mezcla rápida) y +2,2 (para valor alto de velocidad de mezcla rápida)

La interacción que menos tiene influencia en la turbiedad, es la interacción entre pH y velocidad de mezcla rápida.

En la Figura 6 se muestra el efecto de las interacciones de dos factores.



**Figura 6.** Gráfica de interacción para turbiedad. Los factores variados son: A: pH; B: dosis de coagulante; C: velocidad de mezcla rápida; D: velocidad de mezcla lenta.

A continuación se analiza el efecto de las distintas interacciones binarias, teniendo en cuenta que los experimentos realizados buscan obtener valores bajos de turbiedad, lo cual corresponde a altos porcentajes de remoción de este parámetro. Por tanto, en este análisis de interacciones se analizan principalmente los valores bajos de turbiedad. En la última columna de la Tabla 6 se puede observar la magnitud del cambio en la turbiedad por efecto de las diferentes interacciones.

**Interacción AD: interacción negativa.** Cabe resaltar que la interacción AD es la primera en importancia con respecto al efecto sobre la turbiedad. Se presentan cambios grandes en el comportamiento de la turbiedad, indicando que la menor turbiedad se presenta a condiciones bajas de pH y altos gradientes de velocidad de mezcla lenta, pero a medida que el pH aumenta la turbiedad aumenta al menos en 10 NTU. En la Tabla 6 se muestra el orden de influencia de las distintas interacciones, obtenido con base en la Tabla 5 de análisis de varianza.

El caso contrario ocurre en gradientes de velocidad de mezcla lenta bajos: cuando el pH se encuentra en condiciones bajas se presenta altos niveles de turbiedad mientras que a altos pH y bajos gradientes de velocidad de mezcla lenta se presenta un disminución de turbiedad, pero el cambio no es tan representativo como las variaciones que se presentan a gradientes de mezcla lenta con respecto a la turbiedad.

**Interacción BD: interacción negativa.** El mismo patrón de comportamiento de la interacción AD ocurre con la dosis de coagulante y el gradiente de velocidad de mezcla lenta, en el cual se observa un mínimo valor de la turbiedad en altos gradientes de velocidad lenta, pero se observan comportamientos opuestos cuando los niveles de los factores dosis de coagulante y velocidad de mezcla rápida cambian de nivel alto a bajo.

**Interacción CD: interacción positiva.** Cabe recordar que la interacción CD es la segunda en importancia con respecto al efecto en la turbiedad. Se observa un menor valor de la turbiedad con la línea para valor alto de la velocidad de mezcla lenta, combinado con valor bajo de la velocidad de mezcla rápida. Se observa un alto valor de la turbiedad para la línea de valor bajo de la velocidad de mezcla lenta.

**Interacción BC: interacción inversa.** La línea para valor alto y la línea para valor bajo de velocidad de mezcla rápida se cruzan. En todo caso se obtiene menor valor de turbiedad con la línea para valor bajo de la velocidad de mezcla rápida, combinado con valor bajo de la dosis de coagulante.

**Interacción AC: interacción inversa.** La línea para valor alto y la línea para valor bajo de velocidad de mezcla rápida se cruzan. En todo caso, se obtiene menor turbiedad con la línea para valor bajo de velocidad de mezcla rápida, combinada con un valor bajo de pH.

**Interacción AB: interacción inversa.** Se presenta un cruzamiento de la curva para valor alto con la línea para valor bajo de dosis de coagulante. Sin embargo, se presenta menor turbiedad con la línea para valor bajo de la dosis de coagulante, conminada con valor bajo de pH.

Un análisis más riguroso deberá tener en cuenta con mayor detalle el efecto de pH y la velocidad de mezcla lenta lo cual es coherente con lo propuesto por Laines [4], ya que estos fueron los factores principales relevantes para el análisis según la gráfica de Pareto y la ANOVA. Incluso, la gráfica de factores principales muestra que el gradiente de mezcla lenta es el factor que más influencia tiene en la turbiedad.

Los resultados del análisis de la turbiedad utilizando la combinación sulfato de aluminio/ almidón de plátano 50:50 en peso mostraron los mayores valores en la remoción de este parámetro, corroborando las propiedades químicas del almidón como agente gelificante y espesante [1,6]. Sin embargo la influencia para este resultado implicó valores de pH de 5 y una velocidad de mezcla lenta de 20rpm.

Los valores numéricos obtenidos del análisis de varianza son específicos para las condiciones de operación existentes, es decir, las características de la muestra de agua cruda y de la muestra de almidón de plátano, y los valores específicos de los siguientes factores: dosis de almidón de plátano, dosis de sulfato de aluminio, rango de valores de pH, velocidad y tiempo de mezcla rápida, velocidad y tiempo de mezcla lenta, tiempo de sedimentación. Es claro que en el caso de que al menos una de las características mencionadas varíe, los valores numéricos obtenidos del análisis de varianza no son aplicables.

## Conclusiones

Las observaciones realizadas durante las pruebas de jarras y los datos de turbiedad indican que el almidón de plátano utilizado es efectivo como ayudante de floculación, cuando se usa sulfato de aluminio líquido. De este modo se corrobora que el almidón de plátano es prometedor para substituir el uso de polielectrolitos comerciales y reducir así los costos de los tratamientos por coagulación/floculación. Cuando se usó sulfato de aluminio granulado no se obtuvo una identificación clara de los factores relevantes, de modo que los datos no son adecuados para el análisis estadístico.

El experimento factorial  $2^k$  permitió determinar la influencia de distintos factores en la turbiedad para el caso de agua tomada de la fuente natural, utilizando almidón de plátano como ayuda de floculación. Aunque el diseño  $2^k$  utilizado comprende un bajo número de ensayos, se obtienen resultados consistentes. Se verificó que es posible describir el comportamiento de la turbiedad en función de un número relativamente bajo de variables. Esto facilita la definición de parámetros a variar en las pruebas de jarras, y permite una reducción en el número de ensayos y por lo tanto una reducción de los costos correspondientes. Así, se verificó que el diseño factorial  $2^k$  contribuye significativamente en la determinación de condiciones óptimas de operación de los procesos de coagulación/floculación.

El uso de coagulantes vegetales como complemento de las tecnologías para tratamiento de agua que va a ser sometida a potabilización, representa una oportunidad de investigación e innovación, pues soporta gran parte del desarrollo de la región, además de contribuir a la sostenibilidad generando nuevos valores agregados para las materias primas locales.

Se observó que el sulfato de aluminio debe de agregarse diluido en lugar de granulado, teniendo en cuenta que los experimentos con sulfato de aluminio granulado generaron unos datos que no fueron adecuados para análisis estadístico.

Los datos de las corridas con menor y mayor remoción de turbiedad presentados en la Tabla 3 permiten obtener varias conclusiones, que son válidas para las condiciones de estudio y para el agua considerada:

Se obtiene mayor efectividad con una proporción 50:50 en peso de sulfato de aluminio - almidón de plátano, que con una proporción de 20:80 en peso de sulfato de aluminio a almidón de plátano. Esto indica que una proporción muy baja de sulfato de aluminio implica menor efectividad de remoción de turbiedad, lo cual es coherente con el siguiente factor mencionado en el trabajo de Laines [4]: el sulfato de aluminio genera una oxidación química de la materia orgánica disuelta, mientras que el almidón de plátano sólo remueve la fracción particulada de DQO y no la fracción disuelta.

Conviene tener un valor menor de la velocidad de mezcla rápida, de 100rpm en lugar de 150rpm. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que un valor muy bajo de la velocidad de mezcla rápida no lograría la turbulencia necesaria para que haya buena dispersión de los insumos en el agua bajo estudio. Conviene tener un valor mayor de la velocidad de mezcla lenta, de 50rpm en lugar de 20rpm. La etapa de mezcla lenta involucra el contacto de las partículas en pro de la formación de flóculos, de modo que un valor muy bajo de la velocidad de mezcla lenta no logra este contacto. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que una velocidad muy alta de mezcla lenta implica que los esfuerzos cortantes rompen los flóculos, impidiendo su formación.

Conviene un pH de 5 en lugar de 7, lo cual depende del agua a tratar, del coagulante que es sulfato de aluminio, y del almidón de plátano. El hecho de que la menor turbiedad se presente para valor bajo de pH, es decir pH de 5, es coherente con la literatura, pues en el trabajo de Dogu y Arol [5] se observó que la adsorción del almidón es óptima para pH en el rango 3-6, y mejoraba a medida que se tomaban

valores de pH menores, y la mejor adsorción se presentó para pH de 3.

Los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia fueron verificados estadísticamente: los datos analizados siguen una distribución normal, no siguen ningún patrón de distribución, y son independientes. Así, esto implica que los datos obtenidos en las pruebas de jarras de acuerdo con diseño 2<sup>k</sup> pueden ser analizados por análisis de varianza.

La gráfica de Pareto y la ANOVA indica que los factores que tienen más influencia en la turbiedad son la velocidad de mezcla lenta y el pH, pero de estos dos, el que tiene mayor influencia en la turbiedad es la velocidad de mezcla lenta. Esto es coherente con la literatura, donde se expresa que el pH y la velocidad de mezcla son variables que influyen significativamente los resultados del proceso de coagulación/floculación.

La velocidad de mezcla lenta está relacionada con la adsorción entre los coloides, lo que comprende el contacto entre las partículas en pro de la formación de flóculos. Un valor muy alto genera el rompimiento de los flóculos, mientras que un valor muy bajo genera ausencia de contacto entre las partículas y por tanto ausencia de formación de flóculos. El pH es un factor clave para el éxito del proceso de coagulación-floculación, con base en el cual se define o determina el punto óptimo del proceso de coagulación-floculación, como es reconocido en la literatura.

Así, en futuras pruebas se debe tener en cuenta el pH y la velocidad de mezcla lenta como las variables que más requieren variación en la determinación de punto óptimo de las condiciones de operación.

### Referencias bibliográficas

[1] Arboleda J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; 1992.

[2] Sableviciene D, Klimaviciute R, Bendoraitiene J, Zemaitaitis A. Flocculation properties of high-substituted cationic starches. *Colloids and Surfaces*. 2005;259(1-3):23-30.

[3] Shogren R. Flocculation of kaolin by waxy maize starch phosphates. *Carbohydrate Polymers*. 2009;76(4):639-44.

[4] Laines JR, Goñi JA, Adams RH, Camacho W. Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *Interciencia*. 2008;33(1):22-8.

[5] Dogu I, Arol AI. Separation of dark-colored minerals from feldspar by selective flocculation using starch. *Powder Technol*. 2004;139(3):258-63.

[6] Ortega JA, Laines JR, Aparicio MA. Almidón modificado de plátano: posible uso en el tratamiento de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. *Kuxulkab*. 2010;17(31):87-96.

[7] Järnström L, Lason L, Rigdahl M. Flocculation in kaolin suspensions induced by modified starches 1. Cationically modified starch—effects of temperature and ionic strength. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1995;104(2-3):191-205.

[8] Guzmán LE, García R. Uso de coagulantes naturales para la remoción de color y turbidez en tratamiento de agua potable (tesis de especialización). Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena; 2012.

[9] Ebeling J, Rishel K, Sibrell P. Screening and evaluation of polymers as flocculation aids for the treatment of aquacultural effluents. *Aquacultural Engineering*. 2005;33(4):235-49.

[10] Abramovich B, Fernández E, Lurá M, Gilli M, Haye M, Vaira S, Zerbato M, Rey V. Remoción de enteroparásitos en agua por coagulación, floculación y sedimentación. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 2002;5(62):55-62.

[11] Yin C. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. 2010;45(9):1437-44.

[12] Castellanos MC, Becerra N, Carreño L, Páez LP. Estudio comparativo de la acción coagulante-floculante del mucílago de *Opuntia ficus* por los métodos: coagulación y electrocoagulación en los lixiviados del relleno sanitario Pirgua de Tunja. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. 2012;05(01):44-55.

[13] Espinosa V. Estudios estructurales de almidón de fuentes no convencionales: Mango (*Mangifera indica* L.) y plátano (*Musa paradisiaca* L.) (tesis de Maestría). Yauatepec, Morelos, México: Instituto Politécnico Nacional; 2007.

[14] Xing G, Zhang S, Ju B, Yang JZ. Recent advances in modified starch as flocculant. *Proceedings of the Third International Conference on Functional Molecules*; 2005; Dalian, China. Dalian: Dalian University of Technology; 2005. p. 13-18.

[15] Gómez NA. Remoción de materia orgánica por

- coagulación-floculación (tesis de pregrado). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2005.
- [16] Henao JD, Isaza GC. Diseño y construcción de una unidad de banco para coagulación, floculación y sedimentación (tesis de pregrado). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2004.
- [17] Ebeling J, Sibrell P, Ogden S, Summerfelt S. Evaluation of chemical coagulation-flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. *Aquacultural Engineering*. 2003;29(1-2):23-42.
- [18] Wang J, Chen Y, Wang Y, Yuan S, Yu H. Optimization of the coagulation-flocculation process for pulp mill wastewater treatment using a combination of uniform design and response surface methodology. *Water Res*. 2011;45(17):5633-40.
- [19] Ibarra PG, Bastidas GD. Estudio de factibilidad de un proceso fisicoquímico para la remoción de carga orgánica, color y turbiedad en aguas residuales de una central de sacrificio (tesis de pregrado). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2004.
- [20] Suárez JJ, Navia GA. Aporte a la utilización de agua termal como coagulante en el tratamiento de las aguas residuales municipales (tesis de especialización). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2007.
- [21] Metcalf & Eddy. *Wastewater engineering, treatment and reuse*. USA: Mc Graw Hill; 2003.
- [22] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19 ed. USA: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation; 1995.
- [23] Romero JA. *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería; 1999.
- [24] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto número 3930 del 2010. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; 2010.
- [25] Ministerio de Desarrollo Económico. *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico -RAS 2000*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Desarrollo Económico; 2000.
- [26] Liu B, Yang M, Qi B, Chen X, Su Z, Wan Y. Optimizing L-(+)-lactic acid production by thermophile *Lactobacillus plantarum* As.1.3 using alternative nitrogen sources with response surface method. *Biochemical Engineering Journal*. 2010;52(2):212-9.
- [27] Balusu R, Paduru R, Kuravi S, Seenayya G, Reddy G. Optimization of critical medium components using response surface methodology for ethanol production from cellulosic biomass by *Clostridium thermocellum* SS19. *Process Biochemistry*. 2005;40(9):3025-30.
- [28] Davila J, Marriaga N, Machuca F. Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación -electroflotación. *DYNA*. 2009;76(158):41-4.
- [29] Alonso-González O, Zertuche-Salas M, Nava-Alonso F, & Uribe-Salas A. Aplicación del diseño de experimentos factorial  $2^k$  en la evaluación del uso de aminos para la remoción de complejos cobre-cianuro de soluciones de cianuración. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 2009;1(2):821-6.
- [30] Montgomery DC. *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley; 2007.