

COAGULANTES NATURALES EXTRAÍDOS POR LIOFILIZACIÓN APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS



YUDITH CHOQUE-QUISPE

DAVID CHOQUE-QUISPE

AYDEÉ M. SOLANO-REYNOSO

MERY LUZ MASCO-ARRIOLA

LILIANA ASUNCIÓN SUMARRIVA-BUSTINZA

JOHN PETER AGUIRRE-LANDA

HENRRY W. AGREDA CERNA

KATIA CHOQUE-QUISPE

ANTONIETA MOJO-QUISANI

JULIO CÉSAR LOAYZA-CÉSPEDES

COAGULANTES NATURALES EXTRAÍDOS POR LIOFILIZACIÓN APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS



YUDITH CHOQUE-QUISPE

DAVID CHOQUE-QUISPE

AYDEÉ M. SOLANO-REYNOSO

MERY LUZ MASCO-ARRIOLA

LILIANA ASUNCIÓN SUMARRIVA-BUSTINZA

JOHN PETER AGUIRRE-LANDA

HENRRY W. AGREDA CERNA

KATIA CHOQUE-QUISPE

ANTONIETA MOJO-QUISANI

JULIO CÉSAR LOAYZA-CÉSPEDES

Editora chefe

Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof^a Dr^a Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Prof^a Dr^a Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof^a Dr^a Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profº Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabricio Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profº Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Profº Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
Profº Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profº Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profº Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
Profº Drª Natíeli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profº Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Profº Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Profº Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
Profº Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Coagulantes naturales extraídos por liofilización aplicación en el tratamiento de aguas

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Flávia Roberta Barão
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C652	Coagulantes naturales extraídos por liofilización aplicación en el tratamiento de aguas / Judith Choque-Quispe, David Choque-Quispe, Aydeé M. Solano-Reynoso, et al. - Ponta Grossa - PR, 2023.
	Otros autores Mery Luz Masco-Arriola Liliana Asunción Sumarriva-Bustinza John Peter Aguirre-Landa Henrry W. Agreda Cerna Katia Choque-Quispe Antonieta Mojo-Quisani Julio César Loayza-Céspedes
	Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acceso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-0898-7 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.987232601
	1. Tratamiento de agua. I. Choque-Quispe, Judith. II. Choque-Quispe, David. III. Solano-Reynoso, Aydeé M. IV. Título.
	CDD 628.3
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos - CRB-8/9166	

Atena Editora

Ponta Grossa - Paraná - Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declararam que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão; 3. Certificam que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicepresidencia de la Universidad Nacional José María Arguedas de Andahuaylas.

Al grupo de Investigación en desarrollo de materiales avanzados para el tratamiento de aguas y alimentos - (G-LIMTA)

Al Laboratorio de Investigación en Nanotecnología de Alimentos (LINA), de la Universidad Nacional José María Arguedas.

Al Laboratorio de Investigación en Control y Análisis de Aguas (LICAA), de la Universidad Nacional José María Arguedas.

El libro **Coagulantes naturales extraídos por liofilización y su aplicación en el tratamiento de aguas**, ha sido elaborado considerando la producción silvestre de dos Cactaceas altoandinas Nopal (*Opuntia ficus*) y San Pedro (*Echinopsis pachanoi*). Estos materiales han sido empleados en numerosas investigaciones a lo largo de la historia y en el mundo. Sin embargo, las condiciones de crecimiento influyen significativamente sobre las cualidades funcionales de cualquier material genético.

Por ello el libro aborda temas centrales sobre las características del material genético, y su uso como coagulantes, la teoría de los procesos de coagulación – floculación, y aspectos generales de la calidad de agua para consumo humano.

Por otra parte, se ha considerado, un aporte experimental de la aplicación de estos coagulantes naturales, desde su extracción por liofilización, ensayos en el tratamiento de agua simuladas, y la optimización del proceso, abordando sus resultados y la discusión de las mismas.

PROLOGO

La utilización de materiales biológicos altoandinos del Perú, como las cactáceas de las especies Nopal (*Opuntia ficus*) y San Pedro (*Echinopsis pachanoi*), han sido importantes y han estado ligadas a una gran cantidad de culturas y pueblos latinoamericanos, y en muchas partes del mundo se hace uso de estas de muy distintas maneras, algunas alimenticias otras forrajeras y otras son importantes por sus propiedades medicinales. Otros de los usos y aplicaciones que encuentra son la clarificación de aguas, como polímeros naturales.

Los polímeros naturales son aquellos que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas. Estos polímeros son complejos en su composición química, están constituidos principalmente por varios tipos de polisacáridos y proteínas. Algunos de ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes y en muchos lugares son usados en forma empírica por los nativos para aclarar el agua turbia con resultados satisfactorios.

Actualmente las comunidades en general enfrentan el reto de tratar las aguas para sus diferentes servicios, es así que en la actualidad, el creciente interés por el tema ambiental y de salud pública, los estándares internacionales de calidad y medio ambiente ha motivado el surgimiento de nuevas normas que implican una evaluación de los procesos existentes del tratamiento de aguas y una mayor exigencia ambiental a los nuevos proyectos.

El continuo desarrollo tecnológico e investigativo nos obliga a evolucionar los procesos de tratamientos de aguas. Es importante evaluar nuevos productos que han sido desarrollados con el fin de mejorar el proceso de tratamientos de aguas en general, como también dar a conocer importantes desarrollos tecnológicos en cuanto a nuevos equipos y diferentes alternativas para el tratamiento del agua cruda. Todo esto con el fin de dar un diagnóstico de las propuestas que se pretenden plantear.

La clarificación incluye los procesos de coagulación–floculación, donde la coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante. La floculación por su parte, consiste en la aglomeración de las partículas desestabilizadas, que forman pequeñas masas con una densidad específica mayor que la del agua, por lo que sedimentan y permiten que haya una remoción de partículas coloidales y suspendidas.

LISTADO DE ABREVIATURAS.....	1
INTRODUCCIÓN	2
AGUA PARA CONSUMO HUMANO	4
TRATAMIENTOS PARA REMOCIÓN DE MATERIA EN SUSPENSIÓN	6
Desbaste	6
Sedimentación.....	6
Filtración	7
Flotación	7
COAGULACIÓN	9
Teoría de la coagulación	9
Factores que influyen en la coagulación	10
Clases de coagulantes.....	11
FLOCULACIÓN.....	12
Cinética de la floculación	12
Factores que influyen en la floculación	12
Fundamento teórico de la coagulación-floculación.....	13
LIOFILIZACIÓN	15
Proceso de liofilización	16
LAS CACTACEAS.....	19
Variedades de cactaceas	19
LAS CACTACEAS COMO COAGULANTES	22
APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN.....	23
Diseño experimental.....	23
Procedencia de las muestras genéticas	23
Extracción del coagulante natural.....	23
Preparación del agua artificial	24

Proceso de coagulación y/o floculación	24
Rendimiento de extracción de coagulante.....	24
Capacidad clarificante	25
Evaluación de la actividad floculante.....	25
Evaluación del porcentaje de remoción.....	25
Características fisicoquímicas del agua	25
Optimización de la capacidad floculante.....	25
Ajuste de los modelos matemáticos	26
CAPACIDAD DE REMOCIÓN Y MODELADO	27
Rendimiento de extracción de coagulantes	27
Actividad floculante - AF.....	27
Evaluación del porcentaje de remoción.....	32
Parámetros fisicoquímicos del agua tratada.....	36
pH del agua tratada	36
Turbiedad del agua tratada.....	39
Dureza del agua tratada	43
Conductividad	46
CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE LA CAPACIDAD FLOCULANTE....	50
Modelos para la capacidad coagulante del nopal	50
Actividad floculante (af).....	50
Porcentaje de remoción (%r)	51
pH	52
Turbidez	53
Dureza.....	54
Conductividad.....	55
Modelos para la capacidad del coagulante san pedro	56
Actividad floculante (AF)	56

Porcentaje de remoción (%r)	57
pH	58
Turbidez	59
Dureza.....	60
Conductividad.....	61
OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL FLOCULACIÓN	63
Aplicación del coagulante de nopal.....	63
Aplicación del coagulante de San Pedro	64
APORTES TEÓRICOS DE LA EXPERIMENTACIÓN	66
Del rendimiento de extracción de coagulante	66
De la capacidad clarificante	66
Parámetros fisicoquímicos del agua tratada.....	68
De la optimización de los parámetros de floculación.....	70
CONCLUSIONES.....	72
REFERENCIAS.....	73
DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	77
PANEL FOTOGRÁFICO	79
SOBRE OS AUTORES	83

LISTADO DE ABREVIATURAS

%R, porcentaje de remoción

AF, actividad floculante

ANOVA, análisis de varianza

C, concentración de coagulante

Cond, conductividad

D, dureza

ECA, Estándares de Calidad Ambiental

g, gramo

LMP, Límites Máximos Permisibles

MINAM, Ministerio del Ambiente

nm, nanómetros

NTU, unidades técnicas Nefelométricas

pH, potencial de hidrogeniones

p-value, probabilidad evaluada

R², coeficiente de correlación ajustada

RPM, revoluciones por minuto

s, desviación estándar

T, turbiedad

INTRODUCCIÓN

Las cactáceas constituyen una de las familias botánicas más abundantes en el Perú, encontrándose en todos los pisos altitudinales, en una gran cantidad de géneros y especies. Es así que desde tiempos remotos las cactáceas han sido importantes y han estado ligadas a una gran cantidad de culturas y pueblos latinoamericanos, y en muchas partes del mundo se hace uso de estas de muy distintas maneras, algunas alimenticias otras forrajeras y otras son importantes por sus propiedades medicinales. Otros de los usos y aplicaciones que encuentra son la clarificación de aguas, como polímeros naturales. Los polímeros naturales son aquellos que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas. Estos polímeros son complejos en su composición química, están constituidos principalmente por varios tipos de polisacáridos y proteínas. Algunos de ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes y en muchos lugares son usados en forma empírica por los nativos para aclarar el agua turbia con resultados satisfactorios.

El coagulante más usado es el sulfato de aluminio, el cual presenta muy buenos resultados en cuanto a la remoción de contaminantes, sin embargo, el impacto económico debido a su uso es muy alto. Además, su uso genera grandes cantidades de lodos de desecho, los cuales son difíciles de tratar (Donato et al. 2006), y los altos niveles de aluminio remanente en las aguas tratadas ponen en riesgo la salud pública debido a que en grandes concentraciones pueden ser causantes del síndrome de Alzheimer, lo cual ha sido demostrado en investigaciones médicas realizadas en Inglaterra, donde se ha encontrado que el riesgo de contraer esta enfermedad es 1,5 veces mayor en aquellos sitios donde las concentraciones de aluminio en el agua exceden los 0,110 mg/l (González et al., 1991). Por otra parte, los lodos remanentes generan tierras inertes no aptas para algún cultivo.

De otro lado, debido a los problemas que presenta el uso de coagulantes, que fueron mencionados anteriormente, es de suma importancia usar floculantes en el tratamiento del agua, ya que estos por su naturaleza de acción, son ayudantes de la coagulación, por lo que reducen en un alto grado la dosis requerida de coagulante durante este proceso, reduciendo los efectos negativos de su uso. Así, su uso es necesario dado que implica una gran disminución en los costos de tratamiento del agua y en la generación de lodos residuales, además de disminuir las posibilidades de enfermedades debidas a la presencia de aluminio residual en el agua (Ramírez y Velásquez, 2006).

Entre la amplia gama de productos naturales estudiados y probados, se han encontrado diversas fuentes de polímeros, por ejemplo de origen vegetal como los almidones extraídos de maíz, papa y Yuca (Arboleda, 2000) (Picado 1984), en los extractos de semillas, hojas y corteza de algunas plantas como por ejemplo al utilizar el cotiledón de

las semillas de *Moringa oleifera* Lam, polímeros extraído de las pencas de la tuna (Martínez et al., 2003) y en productos de origen animal como el quitosano (Spinelli 2001). No obstante, estos polímeros naturales presentan la desventaja de que al utilizarlos sin purificar y sin una extracción adecuada, introducen compuestos solubles y aportan una gran carga de materia orgánica oxidante al agua, lo que interfiere en el proceso de potabilización (Arboleda, 2000) (Okuda et al., 2001). Se ha encontrado que extractos acuosos de tuna y mozote aplicados como ayudantes de coagulación del sulfato de aluminio en agua artificial, han dejado el agua tratada con valores de DQO (como indicador de materia orgánica soluble) superiores al tratamiento convencional donde se aplicó un polímero catiónico sintético como floculante (Jiménez et al. 2010). La liofilización es un proceso que permite mantener intactas las propiedades funcionales de los materiales con alta humedad, y la aplicación en coagulantes de cactáceas permitirá conocer si este método mejora su capacidad floculante, ya que estos son poli electrolitos (polímeros con unidades monoméricas con grupos ionizables), los cuales pueden ser suficientemente largas y flexibles para ser adsorbidas sobre diversas partículas (García, 2005), debido a su contenido de gomas, almidones y proteínas, las cuales logran desestabilizar partículas coloidales, precipitar y agrupar sólidos suspendidos, facilitando la extracción por medio de la formación de flocs (Inchausti et al., 2000).

AGUA PARA CONSUMO HUMANO

En las normas actuales, si bien se establecen los límites bacteriológicos para los diferentes usos, más no se contemplan los estándares microbiológicos que garanticen, por ejemplo, que el agua residual tratada y utilizada en los parques y jardines sea la adecuada, por lo que se propicia la contaminación del entorno urbano afectando su salubridad, teniendo incluso menos cuidado en las actividades agropecuarias, donde mayormente se utiliza este recurso (Bolaños y Fernández, 2002).

En efecto, como complemento a este tema es necesario indicar las enfermedades asociadas al agua; de acuerdo a lo informado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente – CEPIS en su documento denominado: El costo social de las enfermedades infecciosas, estas enfermedades se dividen en:

- Las transmitidas por el agua: originadas por el agua contaminada con desechos humanos, animales o químicos, que incluyen el cólera, la fiebre tifoidea, la shigella, la poliomielitis, la meningitis, la hepatitis y la diarrea; siendo la diarrea, la que ha provocado más muertes de niños en los últimos 10 años que todos los conflictos armados ocurridos después de la segunda guerra mundial. Así solo en el año 2001 murieron 1,96 millones de personas a causa de diarrea infecciosa, de los cuales 1,3 millones eran niños.
- Las que tienen como base el agua: causadas por organismos acuáticos que pasan parte de su vida en el agua y parte como parásitos de animales; las enfermedades son causadas por gusanos denominadas helmintos; se refiere que 88 millones de menores de 15 años se infectan cada año con la esquistosomiasis.
- Las de orígenes vectoriales relacionados con el agua: transmitidas por vectores como los mosquitos y la mosca tse tse, que infectan al hombre produciendo la malaria, fiebre amarilla, dengue, enfermedad del sueño y filariasis. Solo la malaria causa al menos 300 millones de casos de enfermedad aguda cada año.
- Las vinculadas a la escasez del agua: incluyen al tracoma y la tuberculosis. Se propagan por condiciones de escasez de agua dulce y sanidad deficiente. Según estimados de SEDAPAL, al año 2007, en el mundo 500 millones de personas padecen de escasez de agua potable y 2 200 millones de habitantes de los países subdesarrollados mueren anualmente por enfermedades relacionadas a la falta de agua potable.

Las enfermedades pueden controlarse con una mejor higiene, para lo cual es imprescindible disponer de suministros adecuados de agua potable y sistemas de saneamiento utilizando tecnologías apropiadas, para recolectar, tratar y disponer las aguas residuales (Mendez y Feliciano, 2010).

En la Tabla 1, se muestra la dotación de agua establecida con el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) para consumo familiar de cinco miembros en promedio y

el uso que se le da en el hogar, según información proporcionada por SEDAPAL. De este volumen, según el RNE, el 80%, se destina a desagües.

Concepto	Cantidad: litros por día
Limpieza de casa	50
Beber y cocinar	20
Lavado de manos y cara	75
Uso del inodoro	175
Lavado de la ropa	225
Uso de la ducha	175
Lavado de los platos	30
Total	750
Promedio por persona	150

Tabla 1. Consumo promedio de agua familia de cinco personas

Fuente: Andía, (2000).

TRATAMIENTOS PARA REMOCIÓN DE MATERIA EN SUSPENSIÓN

La materia en suspensión puede ser de muy diversa índole, desde partículas de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partícula de hasta unos pocos nanómetros (normalmente de naturaleza orgánica). También la concentración de los mismos, tanto en el agua a tratar como en el agua una vez tratada, juega un papel fundamental a la hora de la elección del tratamiento más conveniente (Rodríguez *et al.*, 2006).

Las operaciones para eliminar este tipo de contaminación de aguas suelen ser las primeras en efectuarse, dado que la presencia de partículas en suspensión suele no ser indeseable en muchos otros procesos de tratamiento.

La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos, y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso tratamientos químico-físicos.

A continuación, se describen las operaciones unitarias más habituales. La utilización de una u otra es función de las características de las partículas (tamaño, densidad, forma, etc.) así como de la concentración de las mismas (Rodríguez *et al.*, 2006).

DESBASTE

Es una operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño que el que habitualmente tienen las partículas que arrastran las aguas. El objetivo es eliminarlos y evitar que dañen equipos posteriores del resto de tratamientos. Suele ser un tratamiento previo a cualquier otro.

El equipo que se suele utilizar son rejas por las que se hace circular el agua, construidas por barras metálicas de 6 o más mm, dispuestas paralelamente y espaciadas entre 10 y 100 mm. Se limpian con rastillos que se accionan normalmente de forma mecánica.

En otros casos, si el tipo de sólidos lo permite, se utilizan trituradoras, reduciendo el tamaño de sólidos y separándose posteriormente por sedimentación u otras operaciones.

SEDIMENTACIÓN

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la

densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación.

Realmente, este tipo de partículas (grandes y densas, como las arenas) se tienen en pocas ocasiones en aguas industriales. Lo más habitual es encontrar sólidos poco densos, por lo que es necesario, para hacer más eficaz la operación, llevar a cabo una coagulación-flocculación previa, que como se explicará más adelante, consiste en la adición de ciertos reactivos químicos para favorecer el aumento del tamaño y densidad de las partículas.

La forma de los equipos donde llevar a cabo la sedimentación es variable, en función de las características de las partículas a sedimentar (tamaño, forma, concentración, densidad, etc.).

FILTRACIÓN

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación). En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de Tierra de Diatomeas. También es habitual, para mejorar la eficacia, realizar una coagulación-flocculación previa.

Hay muchas maneras de clasificar los sistemas de filtración: Por gravedad o a presión, lenta o rápida, de torta o en profundidad.

FLOTACIÓN

Operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmiscible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a “flotar” más rápidamente estas gotas, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua.

En esta operación hay un parámetro importante a la hora del diseño: La relación

aire/sólidos, ml/l de aire liberados en el sistema por cada mg/l de concentración de sólidos en suspensión contenidos en el agua a tratar. Es un dato a determinar experimentalmente y suele tener un valor óptimo comprendido entre 0.005 y 0.06.

En el tratamiento de aguas se utiliza aire como agente de flotación, y en función de cómo se introduzca en el líquido, se tienen dos sistemas de flotación: Flotación por aire disuelto (DAF) y Flotación por aire inducido

COAGULACIÓN

La coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancia químicas que son los coagulantes. Esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible (Rodríguez, 2005).

Este proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no se puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacteria, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos en otros.

El uso de cualquier otro proceso para la remoción de partículas muy finas, como la sedimentación simple, resulta muy poco económico y en ocasiones imposible, debido al alto tiempo requerido (Arboleda, 2000).

Para la evaluación de este proceso es tener en cuenta las características físicas y químicas del agua, la dosis del coagulante, la concentración del coagulante, el punto de aplicación del coagulante, la intensidad y el tiempo de mezcla y el tipo de dispositivo de mezcla.

TEORÍA DE LA COAGULACIÓN

Las partículas que forman la turbiedad y el color de las aguas naturales, poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas, pero como también existen cargas eléctricas positivas, se puede afirmar que el agua y las soluciones son eléctricamente neutras. Las cargas eléctricas de las partículas generan fuerzas de repulsión entre ellas, por lo cual se mantienen suspendidas y separadas en el agua. Es por esto que dichas partículas no se sedimentan.

El conjunto formado por estas partículas constituye un sistema coloidal, formado por una doble capa de iones, el cual es sometido a un potencial en la superficie inferior del doble lecho, denominado *potencial Z*. Este potencial tiene un valor crítico, por encima del cual los coloides son estables, y por debajo de él, la repulsión en las partículas se reduce a

un grado tal que chocando con cierta velocidad pueden unirse y flocular. El problema en la coagulación consiste en disminuir el potencial Z por uno de los siguientes métodos:

- Coagulación por neutralización de la carga: Esta se realiza cuando coloides de diferente signo se mezclan en el agua. Esto es lo que sucede cuando se agrega alumbre o sales de hierro al agua.
- Coagulación por disminución del espesor de la doble capa (distancia d). Al incrementarse la concentración de iones en el agua la “distancia d” disminuye, hasta hacer el valor del potencial Z inferior al punto crítico.

El fenómeno de la desestabilización se efectúa mediante una serie de reacciones químicas bastante complejas, de las cuales algunas no se han podido entender lo suficiente. Dentro de esas reacciones se encuentran las que se efectúan con las diversas formas de alcalinidad, por lo cual su contenido disminuye. Además, algunas de estas reacciones producen CO₂, cuyo efecto consiste en el incremento de la acidez del agua y por consiguiente la disminución del pH (Rodríguez, 2005).

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN

- Valencia

Entre mayor sea la valencia del ion, más efectivo resulta como coagulante.

- Capacidad de cambio

Es una medida de la tendencia a remplazar cationes de baja valencia por otros de mayor valencia, provocando la desestabilización y aglomeración de partículas en forma muy rápida.

- Tamaño de las partículas

Las partículas deben poseer el diámetro inferior a una micra. Las partículas con diámetro entre una y cinco micras, sirven como núcleos de floc, en cambio de diámetro superior a cinco micras, son demasiado grandes para ser incorporadas en el floc.

- Temperatura

La temperatura cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor.

- Concentración de iones H⁺ o pH

Para cada coagulante hay por lo menos una zona de pH óptima, en la cual una buena floculación ocurre en el tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante.

- Relación cantidad-tiempo

La cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del

floc.

- Alcalinidad

La alcalinidad guarda la relación con el pH y por lo tanto el contenido de alcalinidad del agua es uno de los factores por considerar en la coagulación.

CLASES DE COAGULANTES

Los coagulantes que se utilizan en la práctica para agua potable son los siguientes:

- **Sales de Aluminio:** Forman un floc ligeramente pesado. Las más conocidas son: El Sulfato de Aluminio, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, que en la práctica se le denomina como Alumbre; el de Aluminio Amoniacal y el Aluminato Sódico. El primero es el que se usa con mayor frecuencia dado su bajo costo y manejo relativamente sencillo.
- **Sales de Hierro:** Se utiliza el Cloruro Férrico, $FeCl_3$, y los Sulfatos de Hierro Férrico y Ferroso, $Fe(SO_4)_3$ y $FeSO_4$. Forman un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento que las sales de aluminio.
- **Polímeros o polielectrolitos:** Son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulantes sino como ayudantes de coagulación. La dosificación de estas sustancias se lleva a cabo en concentraciones muy bajas, lo cual es una gran ventaja y compensa el costo del polímero. Están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas potables ya que se produce una menor cantidad de lodos, adicionalmente el lodo producido es más fácilmente tratable.

FLOCULACIÓN

La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico –flóculos–(Rodríguez, 2005).

CINÉTICA DE LA FLOCULACIÓN

Tan pronto como se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar flóculos que crecen con el tiempo.

La rapidez con que esto ocurre depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su “grado de desestabilización”, que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia.

Los contactos pueden realizarse por dos modos distintos:

- **Floculación Pericinética:** Contactos por bombardeo de las partículas producidos por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) que sólo influye en partículas de tamaños menores a un micrón. Sólo actúa al comienzo del proceso, en los primeros 6 a 10 segundos y es independiente del tamaño de la partícula.
- **Floculación Ortocinética:** Contactos por turbulencia del líquido, esta turbulencia causa el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta notablemente la probabilidad de colisión. Efectivo sólo con partículas mayores a un micrón. Actúa durante el resto del proceso, de 20 a 30 min.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN

- Concentración y naturaleza de las partículas

La velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.

- Tiempo de detención

La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico

el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres (3) unidades.

- Gradiente de velocidad

Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc. El gradiente a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados.

FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

En el campo del tratamiento de aguas, la es, por definición, el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales, que puede conseguirse especialmente por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas. Se llama coagulante al producto utilizado para esta neutralización. La agrupación de las partículas descargadas, al ponerse en contacto unas con otras, constituye la floculación, que da lugar a la formación de flocos capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento del agua. Algunos productos pueden favorecer a formación del floculo; a éstos se les llama floculantes. La separación sólido-líquido, del floculo formado y del agua, puede hacerse por filtración, por decantación o flotación, seguidas o no de filtración (Guerrero *et al.*, 2003).

En el proceso de coagulación, los coagulantes más utilizados son sales de aluminio o de hierro. El fenómeno de coagulación se manifiesta de las formas que se muestran en la Figura 1 y 2.

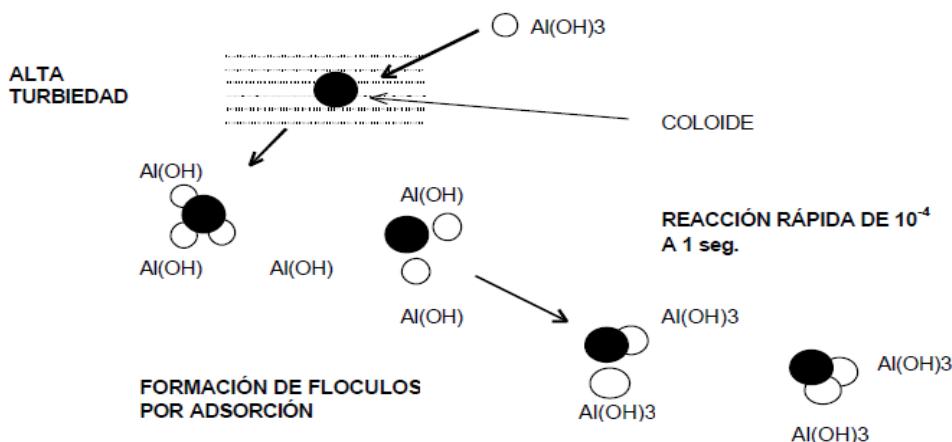


Figura 1. Coagulación por adsorción

Fuente: Andía, (2000)

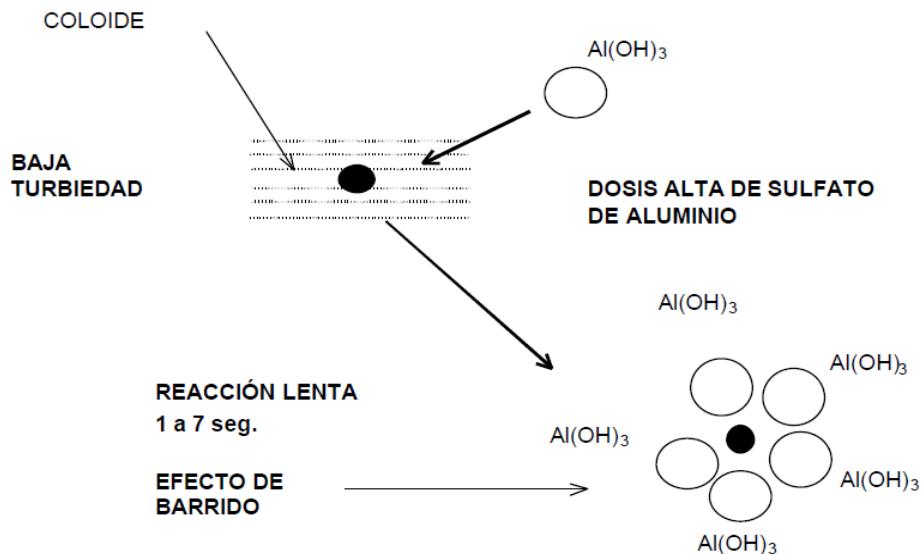


Figura 2. Coagulación por barrido

Fuente: Andía, (2000)

LIOFILIZACIÓN

La liofilización, que se basa en el desecado de determinados materiales por medio de la sublimación del agua contenida en éstos. Se realiza congelando el producto y se remueve el hielo aplicando calor en condiciones de vacío, de esta forma el hielo sublima evitando el paso por la fase líquida (Ramírez, 2006).

Dicha técnica constituye un efectivo sistema de preservación de elementos biológicos como células, enzimas, vacunas, virus, levaduras, sueros, algas, frutas, vegetales y alimentos en general. Todos estos materiales contienen sustancias volátiles o termosensibles que no se ven afectadas por este proceso, ya que se trabaja a temperaturas y presiones reducidas. Lo más importante del método es que no altera la estructura fisicoquímica del producto

Por medio de la liofilización se puede extraer más del 95% del agua contenida en un alimento, lo que se traduce en un gran beneficio con relación al costo del transporte, ya que permite cargar mayor cantidad de mercadería sin necesidad de cadena de frío.

Una sustancia pura puede existir como sólido, líquido o gas y puede cambiar de estado por medio de un proceso en el cual libera o absorbe calor a temperatura constante (calor latente) (Figura 3), de esto depende hacia donde se direcciona dicho cambio. El cambio de fase de sólido a gas o sublimación, debe realizarse en condiciones de presión y temperatura menores a las del punto triple (punto en el que conviven los tres estados de la materia), ya que por debajo de este no existe la fase líquida. En el caso del agua el punto triple se encuentra a 4,58 mmHg y 0,008 °C. Por ejemplo, si se tiene agua congelada, al calentarla a una presión menor a la de dicho punto el hielo sublima (Orrego, 2008).

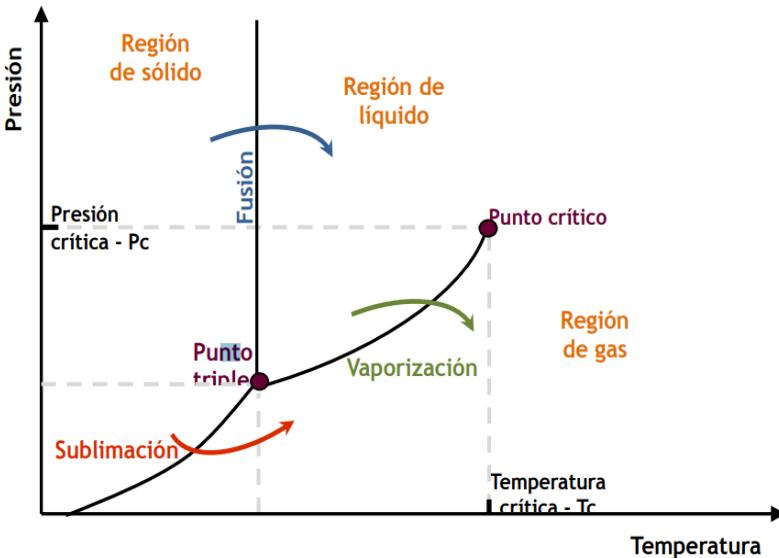


Figura 3. Diagrama de Presión-Temperatura de los estados del agua

Fuente: Roos, (1987)

PROCESO DE LIOFILIZACIÓN

La liofilización involucra cuatro etapas principales (Ramírez, 2006):

1. Preparación
2. Congelación
3. Desecación primaria
4. Desecación secundaria

Antes de comenzar el proceso, es fundamental el acondicionamiento de la materia prima, ya que los productos liofilizados no pueden ser manipulados una vez completado el proceso. Lo que suele hacerse con alimentos como guisantes o arándanos es agujerear la piel con el objetivo de aumentar su permeabilidad. Los líquidos, por otro lado, se concentran previamente con el fin de bajar el contenido de agua, lo que acelera el proceso de liofilización.

La segunda etapa se lleva a cabo en congeladores independientes (separados del equipo liofilizador) o en el mismo equipo. El objetivo es congelar el agua libre del producto. Para ello se trabaja a temperaturas entre -20 y -40°C.

Para la optimización de este proceso es fundamental conocer y controlar:

- La temperatura en la que ocurre la máxima solidificación.
- La velocidad óptima de enfriamiento.

- La temperatura mínima de fusión incipiente.

Con esto se busca que el producto congelado tenga una estructura sólida, sin que haya líquido concentrado, de manera que el secado ocurra únicamente por sublimación. En los alimentos se pueden obtener mezclas de estructuras luego de la congelación, que incluyen cristales de hielo eutécticos, mezclas de eutécticos y zonas vítreas amorfas. Estas últimas se forman por la presencia de azúcares, alcoholes, cetonas, aldehídos y ácidos, así mismo como por las altas concentraciones de sólidos en el producto inicial.

La tercera etapa del proceso consiste en la desecación primaria del producto, por sublimación del solvente congelado (agua en la mayoría de los casos). Para este cambio de fase es necesario reducir la presión en el interior de la cámara, mediante una bomba de vacío, y aplicar calor al producto (calor de sublimación, alrededor de 550 Kcal/Kg en el caso del agua), sin subir la temperatura. Esto último se puede hacer mediante conducción, radiación o fuente de microondas. Los dos primeros se utilizan comercialmente combinándose su efecto al colocarse el producto en bandejas sobre placas calefactoras separadas una distancia bien definida. De esta manera se consigue calentar por conducción, en contacto directo desde el fondo y por radiación, desde la parte superior. Por otro lado, la calefacción por medio de microondas presenta dificultad porque puede provocar fusión parcial del producto, debido a la potencial formación de puntos calientes en su interior; por lo cual actualmente no se aplica comercialmente. Los niveles de vacío y de calentamiento varían según el producto a tratar (Ramírez, 2006).

Al inicio de esta tercera etapa, el hielo sublima desde la superficie del producto y a medida que avanza el proceso, el nivel de sublimación retrocede dentro de él, teniendo entonces que pasar el vapor por capas ya secas para salir del producto. Este vapor, se recoge en la superficie del condensador, el cual debe tener suficiente capacidad de enfriamiento para condensarlo todo, a una temperatura inferior a la del producto.

Para mejorar el rendimiento de esta operación, es primordial efectuar controles sobre la velocidad de secado y sobre la velocidad de calentamiento de las bandejas. El primero se debe a que, si el secado es demasiado rápido, el producto seco fluirá hacia el condensador junto con el producto seco. Producíendose así una pérdida por arrastre de producto. El segundo de los controles, debe realizarse siempre ya que, si se calienta el producto velozmente, el mismo fundirá y como consecuencia el producto perderá calidad. Para evitarlo la temperatura de los productos debe estar siempre por debajo de la temperatura de las placas calefactoras mientras dure el cambio de fase. No obstante, al finalizar la desecación primaria, la temperatura del alimento subirá asintóticamente hacia la temperatura de las placas (Orrego, 2008).

Para tener una liofilización buena y rápida es necesario poder controlar exactamente

esta temperatura y tener la posibilidad de regular la presión total y parcial del sistema.

La cuarta y última etapa del proceso de liofilización, se trata de la desecación secundaria del producto por medio de desorción. Esta consiste en evaporar el agua no congelable, o agua ligada, que se encuentra en los alimentos; logrando que el porcentaje de humedad final sea menor al 2%. Como en este punto no existe agua libre, la temperatura de las bandejas puede subir sin riesgo de que se produzca fusión. Sin embargo, en esta etapa la presión disminuye al mínimo, por lo que se realiza a la máxima capacidad de vacío que pueda alcanzar el equipo. Es importante, finalmente, controlar el contenido final de humedad del producto, de manera que se corresponda con el exigido para garantizar su estabilidad (Sceni, 2007)

LAS CACTACEAS

Cuando Cristóbal Colón descubrió el Nuevo Mundo, hace ya más de quinientos años, empezó la migración de los cactus, oriundos del continente americano, primero hacia Europa, luego al resto del mundo, y este tránsito no sólo no ha terminado, sino que aumenta cada día. Por eso, hoy es posible encontrar cactus cultivados en lugares tan remotos para nosotros como Australia, Japón, Nueva Zelanda o Rusia (Ostolaza, 2010).

En algunos casos, el cultivo de cactus con criterio comercial fuera de América está tan extendido que un viajero desinformado que visite las Islas Canarias o Sicilia, al sur de Italia, podría pensar que estas plantas son propias de estos lugares donde el clima benigno favorece su cultivo masivo que trata de satisfacer la creciente demanda del mercado europeo y asiático.

Pero, ¿a qué se debe esta urgente demanda?, ¿por qué esa poderosa atracción que ejercen los cactus sobre algunas personas, que induce a sus fieles y sufridos cultivadores en muchos y diversos países, incluido el nuestro, a agruparse en sociedades como la Sociedad Peruana de Cactus y Suculentas (SPECS), para poder intercambiar información, experiencias, plantas o semillas? (Ostolaza, 2010).

La respuesta es simple: porque la mayoría de cactus se cultivan como plantas ornamentales, es decir plantas de ornato, plantas de adorno, plantas que, siendo pequeñas, llegan a dar flores en una maceta al poco tiempo de cultivarlas. Además, como tienen formas diferentes al resto de plantas, con flores hermosas, aunque efímeras, y con una resistencia admirable a los malos tratos, en una época donde el tiempo nos queda siempre corto, se han vuelto las favoritas de los amantes de las plantas ornamentales.

Pero, la exclusividad de su distribución en América, desde Canadá al norte hasta la Patagonia argentina, al sur del continente, y la demanda que por ellos existe en este mundo globalizado, los hace vulnerables a aquellas personas sin escrúpulos, que con criterio comercial las depredan inexorablemente, a pesar de la existencia de convenios internacionales para su protección.

Volviendo a los cactus peruanos, diremos que la mayoría de nuestras especies, cuatro de cada cinco, son endémicas, es decir sólo se encuentran en el Perú, formando parte de nuestra rica flora silvestre (Ostolaza, 2010).

VARIEDADES DE CACTACEAS

a. *Echinopsis pachanoi*

Tiene como nombre común “San Pedro” en algunas zonas del Perú. Planta arbórea

(figura 2.3), 3 a 6 m. de alto, ramas numerosas azul-verdoso, 6 a 8 costillas, anchas y redondeadas, con depresión transversal sobre las areolas, espinas generalmente ausentes o escasas, pequeñas, 1 cm. desiguales, amarillo-marrón. Flor de 23 cm. de largo, blancas, con pelo negro (Ostolaza, 2010).

Distribución: Descrita en Cuenca, Ecuador, 2000-3000 m; llega a Huancabamba, Piura; Qda. Santa Cruz, Cordillera Blanca, Ancash, 3 300 m.



Figura 4. Cactacea *Echinopsis pachanoi*, San Pedro

(Fuente: Ostolaza, 2010)

b. *Opuntia ficus*

La revisión de los aspectos teóricos de las sustancias naturales que se plantea en la investigación del coagulante natural alternativo, específicamente la obtención, preservación y aplicación de los polisacáridos de la Tuna (*Opuntia ficus*) como coagulante y/o ayudante de coagulación en agua de alta turbiedad y alta alcalinidad (Hernández, 2005).

Los derivados de la tuna o nopal son polvos blancos solubles en agua que se extractan con relativa facilidad del mucílago. Han sido probados con agua turbia artificial y natural y han dado resultados comparables o mejores que los de los polímeros sintéticos en el tratamiento de aguas superficiales. Su producción no ha sido hecha en escala industrial hasta el momento, pero podría hacerse (Salas, 1998).



Figura 5. Cactacea *Opuntia ficus*, Tuna

LAS CACTACEAS COMO COAGULANTES

La precipitación química fue uno de los primeros procesos químicos utilizados en el tratamiento de aguas (Schulz y Okum, 1991).

Actualmente se utilizan muchas y muy diversas substancia como agentes de precipitación, el grado de clarificación obtenido en el proceso depende de la cantidad de productos químicos utilizados y del cuidado con que se controle el proceso por medio de precipitación química es posible obtener un efluente limpio, substancial exento de materia en suspensión o en estado coloidal, éste, como cualquier otro fenómeno natural está regido por diverso factores de los cuales los principales son: mezclado, estabilidad de los coloides, tiempo de retención y velocidad de sedimentación.

Con respecto al mezclado, entendemos que está encaminado a la distribución uniforme y rápida de los coagulantes en el agua que se esté tratando, ya que cuando más alta sea la velocidad y mayor la turbulencia, más eficaz será el mezclado, pudiéndose llevar a cabo el proceso de precipitación totalmente (Rivas, 1983)

En los procesos de tratamiento comunes, la turbulencia es inducida por el uso de impulsores giratorios, tales como paleta, las cuales se utilizan como dispositivos de floculación cuando se añade al agua productos químicos.

La adición de coagulantes puede hacerse de dos maneras:

- Al pasar la masa de agua por un punto determinado en el cual se produce una fuerte turbulencia inducida por un dispositivo hidráulico, orificio, vertedero, etc.
- Reteniendo el agua en un estanque especial por un tiempo de retención nominal, en donde se aplican coagulantes, mientras se agita con una turbina o paleta rotatoria o cualquier otro sistema para crear turbulencia. En ambos casos la turbulencia puedes crearse hidráulica o mecánicamente.

Una vez que la dispersión de los coagulantes se ha llevado a cabo, la agitación debe controlarse con mucho cuidado, de modo que se favorezca el contacto entre las partículas para la formación de floculos (SIQYPN, 1992), ya que se la agitación fuese demasiado fuerte los esfuerzos cortantes que se producen romperán el floculo (CEPIS, 1981).

Stequist y Kaufman (Hanson y Jhon, 2000), demostraron que a medida que la alcalinidad del agua cruda es mayor, el proceso de coagulación queda más afectado por la velocidad con que se dispersan los coagulantes. Con poca alcalinidad, la mezcla puede ser más lenta, con alta alcalinidad la dispersión puede ser instantánea.

APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

DISEÑO EXPERIMENTAL

Se consideró un diseño experimental del tipo factorial 3×2 , es decir con tres niveles para la variable % de coagulante natural y dos niveles para la variable velocidad de agitación (rpm), con un total de 6 tratamientos, la matriz de diseño se muestra en la Tabla 2.

Tratamiento	Variable de entrada		Variable de salida
	coagulante natural (mg/L)	Velocidad de agitación (rpm)	
1	+	+	R1
2	0	+	R2
3	-	+	R3
4	+	-	R4
5	0	-	R5
6	-	-	R6

Tabla 2. Matriz de diseño experimental

Fuente: Elaboración propia

R_i, respuesta numérica de la variable de respuesta "i"

PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS GENÉTICAS

El material genético de Cactáceas de las variedades *Echinopsis pachanoi* y *Opuntia ficus*, procedieron de los cultivos silvestres ubicados en la zona de Santa Rosa del distrito de Talavera a 3000 msnm. Latitud 13°36'07.89'' S, longitud 73°16'33.13'' O, con temperaturas promedios de 13 °C y precipitación promedio anual de 930 mm, de la provincia de Andahuaylas.

EXTRACCIÓN DEL COAGULANTE NATURAL

La extracción del coagulante se realizó de la siguiente manera:

- **Recepción.** Las pencas de las cactáceas recolectadas libre de magulladuras y anomalías superficiales, fueron llevadas a refrigeración para evitar marchitamiento.
- **Lavado.** Las pencas fueron lavadas con abundante agua fresca para eliminar partículas extrañas.

- **Separación de epidermis.** La remoción de la epidermis se realizó primeramente con tijeras para desespinar, enseguida se procedió a remover la capa externa de la penca, dejando solamente la pulpa.
- **Trozado.** Utilizando una cuchilla, se trozo la pulpa en cubos de 1 cm de arista en promedio.
- **Deshidratación.** Las muestras fueron colocadas en capsulas de porcelana y llevadas a congelación a -30°C durante por 24 h. Las muestras congeladas se llevaron a un liofilizador por 48 horas.
- **Molienda.** Las muestras liofilizadas fueron molidas en un mortero, hasta malla 250 micras, para luego ser envasadas y almacenadas.

PREPARACIÓN DEL AGUA ARTIFICIAL

La disolución madre de caolín se preparó disolviendo 25 g del sólido en 500 ml de agua destilada que se homogenizo por 30 minutos de forma manual, la disolución se dejó reposar por 24 horas.

Se tomaron 2 litros de agua y se adiciono 30 ml de disolución madre de caolín.

PROCESO DE COAGULACIÓN Y/O FLOCULACIÓN

Se utilizó la prueba de jarras a través de un equipo de marca Phipps & Bird, que consta de 06 vasos de precipitado de un litro, las cuales se cargan con 200 mL de agua artificial. Se procedió a agitar por un minuto a 60 rpm; en ese lapso se agregó los coagulantes y coadyuvantes (10 ppm de sulfato férrico), a cada vaso, de acuerdo a las formulaciones propuestas (Tabla 2), posteriormente se reduce la velocidad de acuerdo a cada formulación por 15 minutos. Una vez transcurrido el periodo de agitación se detiene el proceso, y se deja sedimentar por 30 minutos, en seguida se extrajo el sobrenadante para las evaluaciones pertinentes.

Se realizó una prueba control únicamente con sulfato férrico 20 ppm y 8 ppm de Cal.

RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE COAGULANTE

Una vez extraída el coagulante natural en cristales, se determinó el rendimiento de extracción de acuerdo a la ecuación (1).

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{g \text{ de cristales de coagulante}}{g \text{ de material utilizado}} * 100$$

ec. (1)

CAPACIDAD CLARIFICANTE

Evaluación de la actividad floculante

Se adaptó la metodología utilizada por Sanchez y Untiveros (2004), para cada formulación (Tabla 2), del sobrenadante se tomó un alícuota y se mide la absorbancia a 550 nm (A). Un experimento control sin utilizar coagulante se llevó a cabo de manera similar y se mide la absorbancia a una longitud de onda de 550 nm (B). La actividad floculante se calcula utilizando la ecuación (2).

$$\text{Actividad floculante} = 1/A - 1/B, \quad \text{ec. (2)}$$

Evaluación del porcentaje de remoción

La eficiencia del proceso se determinó mediante el porcentaje de remoción de turbidez de acuerdo a la ecuación (3) (Yagual y Torres, 2012).

$$\% \text{ de remoción} = \frac{\text{turbidez inicial} - \text{turbidez final}}{\text{turbidez inicial}} * 100 \quad \text{ec. (3)}$$

CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA

Se realizó la caracterización de la calidad del agua tratada para consumo humano, considerando los parámetros mostrados en la Tabla 3, para lo cual se tomara alícuotas del agua sobrenadante procedente de la prueba de coagulación-floculación a través del experimento de jarras.

Parámetro	Método	Referencia
pH	Potenciométrico electrodo selectivo (pH metro)	Manual de uso
Turbiedad	Electrodo selectivo (NTU)	Manual de uso
Conductividad	Electrodo selectivo (Conductivímetro)	Manual de uso
Dureza	Método colorimétrico con EDTA	2340-C, Standard Methods (APHA, 1998)

Tabla 3: Parámetros de calidad del agua tratada

OPTIMIZACIÓN DE LA CAPACIDAD FLOCULANTE

La determinación de los valores adecuados u óptimos del porcentaje de coagulante natural, se realizó a través de la generación de modelos matemáticos a fin de conocer el efecto de las variables sobre la respuesta, los modelos matemáticos se probaron utilizando estadígrafos de ajuste, para lo cual se utilizara el software estadístico Statistica V5 y el

utilitario Solver de Excel (2010).

a. Generación de modelos matemáticos

Se generarán modelos algebraicos de primer orden (ecuación 4) y segundo orden (ecuación 5) (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i \quad \text{ec. (4)}$$

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \sum \beta_{ij} X_i X_j \quad \text{ec. (5)}$$

donde:

Y , es el pronóstico de la variable de respuesta o dependiente

X_i , variable de entrada o independiente, como el porcentaje de coagulante.

X_j , variables de entrada, como la velocidad de agitación.

β_{ij} , son los coeficientes de las variables independientes.

AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

El ajuste de los modelos, se desarrolló de acuerdo al método de estimación de los mínimos cuadrados, que consiste en encontrar la diferencia mínima (*Dif min*) entre los valores experimentales y los valores reportados por el modelo matemático (Tarifa, 2000),

Mientras que la calidad de ajuste de los modelos, se evaluará a través del coeficiente de ajuste R^2 .

CAPACIDAD DE REMOCIÓN Y MODELADO

RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE COAGULANTES

Los resultados del rendimiento de extracción del coagulante para las variedades de cactáceas se presentan en la Tabla 4, de ella se desprende que la variedad San Pedro reporto un rendimiento de $3.29 \pm 0.25 \%$, mientras que la variedad Nopal reporto mayor rendimiento ($7.13 \pm 0.32 \%$), del mismo modo se observa que la extracción del coagulante de la variedad San Pedro presento mayor variabilidad (7.74%), mientras que para el Nopal fue de 7.74%, es así que el rendimiento de extracción para las variedades de cactáceas presentan diferencias significativa ($p\text{-value} < 0.05$, letras diferentes, Anexo 1), por otra parte se observó que el pH del zumo de la penca de Nopal fue de 4.42 ± 0.32 , mientras que para el zumo de la variedad San Pedro fue de 5.30 ± 0.32 , mostrando diferencia significativa.

Variedad	% Rendimiento					pH				
	\bar{X}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*	\bar{X}	\pm	s	C.V. (%)	
San Pedro	3.29	\pm	0.25	7.74	A	5.30	\pm	0.09	1.63	A
Tuna	7.13	\pm	0.32	4.48	B	4.42	\pm	0.10	2.15	B

Tabla 4: Rendimiento de extracción y pH de cactáceas

*Diferencia significativa, evaluado con el test de Tukey al 5% de significancia, Anexo 1.

Donde: \bar{X} , es la media aritmética; s , es la desviación estándar, C.V., es el coeficiente de variabilidad

ACTIVIDAD FLOCULANTE - AF

Los resultados de la actividad floculante se presentan en la Tabla 5, de ella se desprende que esta oscila entre 55.82 a 85.04 para el coagulante de Nopal, mientras que para el coagulante de la variedad San Pedro oscila entre 46.08 a 66.04, del mismo se observa que presentan diferencia significativa ($p\text{-value} < 0.05$) en ambas variedades, por otra parte se aprecia que el tratamiento T3 (70 mg/L y 30 RPM) y T6 (70 mg/L y 40 RPM) reportaron mayor actividad floculante (AF), aunque esta no muestran diferencia significativa (Letras iguales), mientras que los tratamientos T1 (30 mg/L y 30 RPM) y T4 (30 mg/L y 40 RPM) mostraron AF más bajas, no mostrando diferencia significativa (Letras iguales), este mismo hecho se puede observar en la Figura 6.

Por otra parte, se puede apreciar que para el coagulante de la variedad San Pedro el tratamiento T3 (70 mg/L y 30 RPM) reporto mayor AF, mientras que los demás tratamientos muestran similar comportamiento (Letras iguales), este mismo hecho puede evidenciarse

en la Figura 7, donde los intervalos se traslapan.

Tratamiento	Coagulante (mg/L)	RPM	Nopal					San Pedro				
			\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*	\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*
T1	30	30	55.82	\pm	1.89	3.38	D	46.08	\pm	1.25	2.71	B
T2	50	30	76.41	\pm	5.96	7.80	A,B	49.26	\pm	2.507	5.09	B
T3	70	30	85.04	\pm	4.37	5.14	A	66.04	\pm	4.468	6.76	A
T4	30	40	59.23	\pm	2.12	3.58	C,D	46.87	\pm	2.274	4.85	B
T5	50	40	67.43	\pm	2.75	4.08	B,C	50.05	\pm	1.519	3.04	B
T6	70	40	80.37	\pm	3.70	4.60	A	51.91	\pm	2.779	5.35	B

Tabla 5: Actividad Floculante de los coagulantes

*Diferencia significativa, evaluado con el test de Tukey al 5% de significancia, Anexo 2.

Donde: \bar{x} es la media aritmética; s, es la desviación estándar, C.V., es el coeficiente de variabilidad

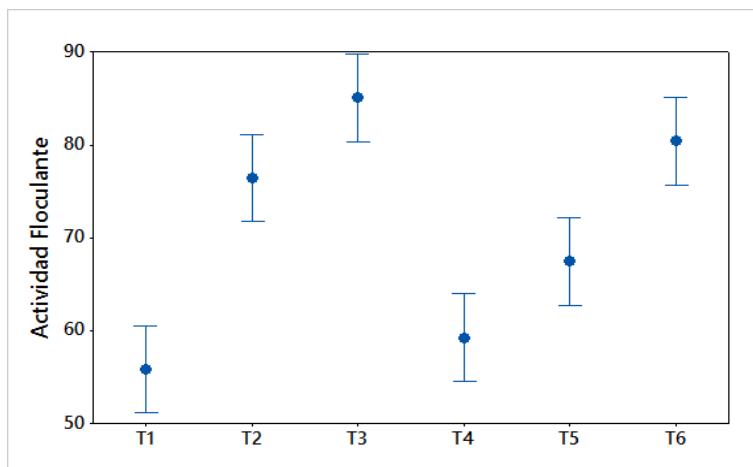


Figura 6. Diagrama de medias para la AF del coagulante de Nopal

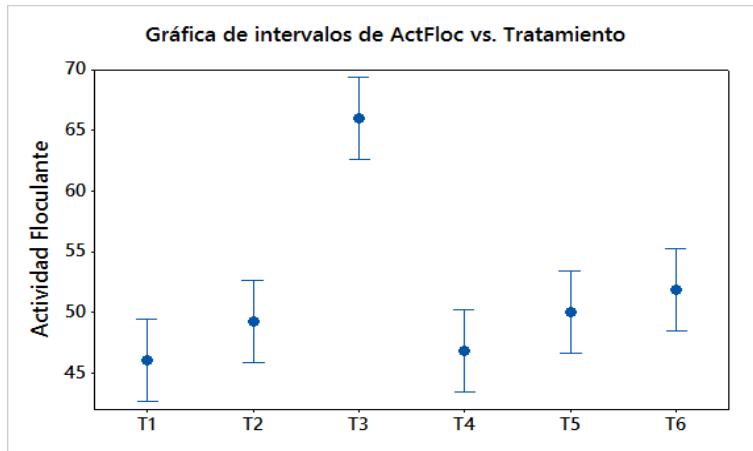


Figura 7. Diagrama de medias para la AF del coagulante San Pedro

Por otra parte se pudo observar que la adición del coagulante de la variedad Nopal y San Pedro presenta efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$) en la AF, tal como se aprecia en la Tabla 6, es decir el incremento de coagulante resulta en aumento considerable de la AF tal como se parecía en la Figura 8 y Figura 9 para ambas variedades, por otra parte se observó que la velocidad de agitación disminuye ligeramente la AF del coagulante Nopal, tal como se aprecia en la Figura 8, aunque esta variación no es significativa es decir no muestra efecto significativo ($p\text{-value} = 0.077$, Tabla 6), por el contrario para la variedad San Pedro el aumento de la velocidad de agitación disminuye considerablemente la AF ($p\text{-value} < 0.05$), tal como se aprecia en la Figura 9.

Fuente	p-value	
	Nopal	San Pedro
Coagulante	0.000	0.000
RPM	0.077	0.006
Coagulante*RPM	0.041	0.000

Tabla 6: ANOVA para efectos e interacción para AF

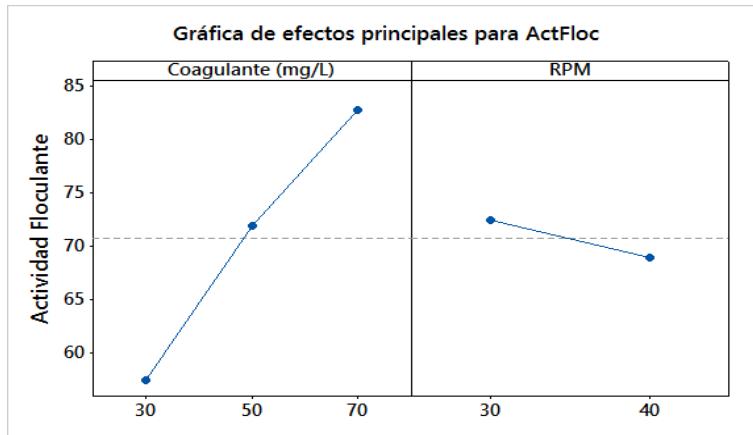


Figura 8. Efectos para la AF del coagulante de Nopal

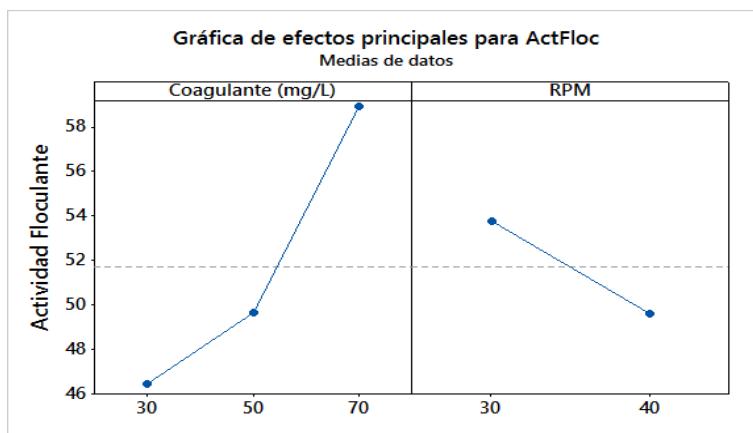


Figura 9. Efectos para la AF del coagulante San Pedro

Del mismo al evaluar el efecto de la interacción dosis de coagulante – velocidad de agitación (Coagulante*RPM), se observa que para ambas variedades de coagulantes esta muestra efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$) en la AF, tal como se aprecia en la Tabla 6, este mismo hecho se puede observar en la Figura 10 para el coagulante de Nopal, donde se aprecia que para cualquier valor de la velocidad de agitación se incremente la AF, mientras que para dosis de coagulante de 50 y 70 mg/L y con incremento de la velocidad la AF disminuye ligeramente, mientras que a 30 mg/L se incrementa ligeramente la AF con la velocidad.

En tanto que para la variedad San Pedro se aprecia que para cualquier velocidad de agitación el incremento de coagulante aumenta la AF, mientras que para una dosis de 70 mg/L de coagulante con el incremento de la velocidad disminuye considerablemente la

AF, aunque este hecho es contrario para dosis de 30 y 50 mg/L donde AF se incrementó ligeramente, tal como se aprecia en la Figura 11, es así que la interacción dosis de coagulante – velocidad de agitación (Coagulante*RPM), presenta efecto significativo (p -value < 0.05) tal como se aprecia en la Tabla 6.

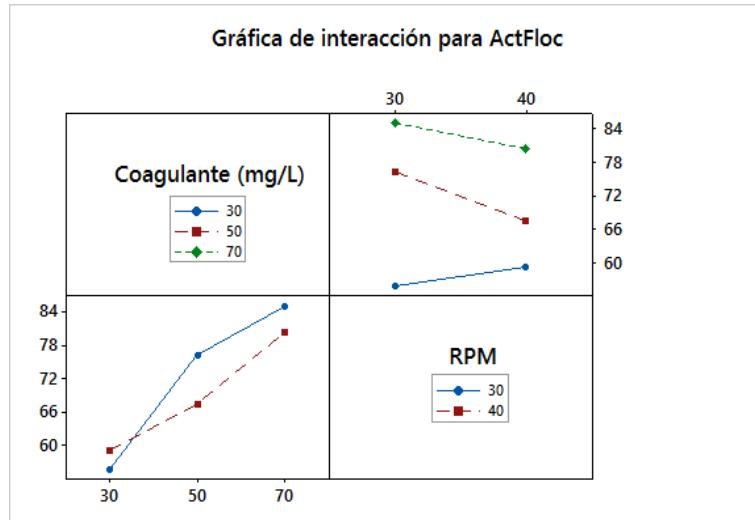


Figura 10. Interacciones para la AF del coagulante de Nopal

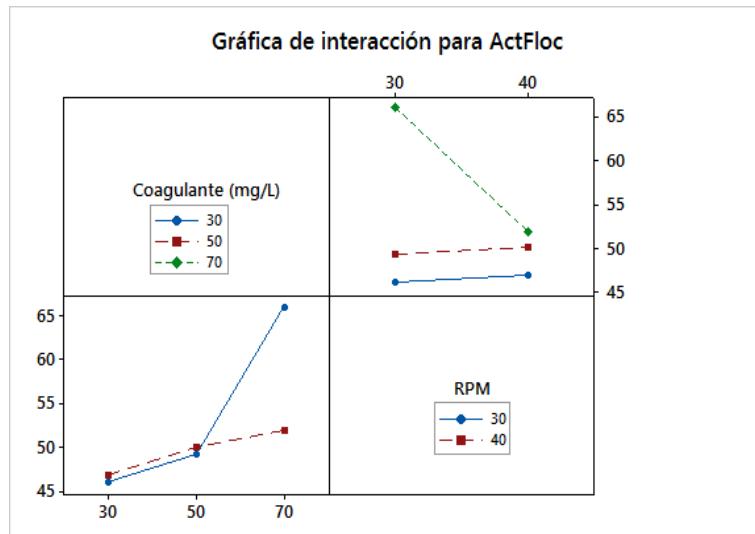


Figura 11. Interacciones para la AF del coagulante San Pedro

EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN

En la Tabla 7 se presentan los resultados del porcentaje de remoción en ella se observa que la remoción osciló entre 99.03 a 99.35 % para el coagulante Nopal mostrando diferencia significativa entre tratamientos (p -value < 0.05), en tanto que para la variedad San Pedro oscilo de 98.50 a 99.03 %, presentando diferencia significativas entre tratamientos (p -value < 0.05), asimismo se pude apreciar que el tratamiento T3 (70 mg/L y 30 rpm) y T6 (70 mg/L y 40 rpm) reportaron mayor porcentaje de remoción (99.35 ± 0.03 % y 99.32 ± 0.03 % respectivamente) aunque no presentan diferencias estadísticas entre (Letras iguales) con el coagulante San Pedro, el mismo hecho sucedió para la variedad San Pedro para los tratamientos T3 y T6.

Tratamiento	Coagulante (mg/L)	RPM	Nopal					San Pedro				
			\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*	\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*
T1	30	30	99.03	\pm	0.06	0.07	B	98.50	\pm	0.047	0.05	D
T2	50	30	99.30	\pm	0.05	0.05	A	98.72	\pm	0.047	0.05	C
T3	70	30	99.35	\pm	0.03	0.03	A	99.03	\pm	0.047	0.05	A
T4	30	40	99.06	\pm	0.04	0.04	B	98.59	\pm	0.047	0.05	D
T5	50	40	99.25	\pm	0.02	0.02	A	98.90	\pm	0.047	0.05	B
T6	70	40	99.32	\pm	0.03	0.03	A	99.03	\pm	0.018	0.02	A

Tabla 7: Remoción (%) de los coagulantes

*Diferencia significativa, evaluado con el test de Tukey al 5% de significancia, Anexo 3.

Donde: \bar{x} es la media aritmética; s es la desviación estándar, C.V., es el coeficiente de variabilidad

Por otra parte, se puede apreciar que los tratamientos T1 y T4, reportaron menor remoción para el coagulante de Nopal, tal como se muestra en la Figura 12, estos tratamientos fueron sometidos a dosis de 30 mg/L, del mismo modo para la variedad San Pedro los tratamientos T1 y T4 fueron los que reportaron menor remoción, tal como se aprecia en la Figura 13.

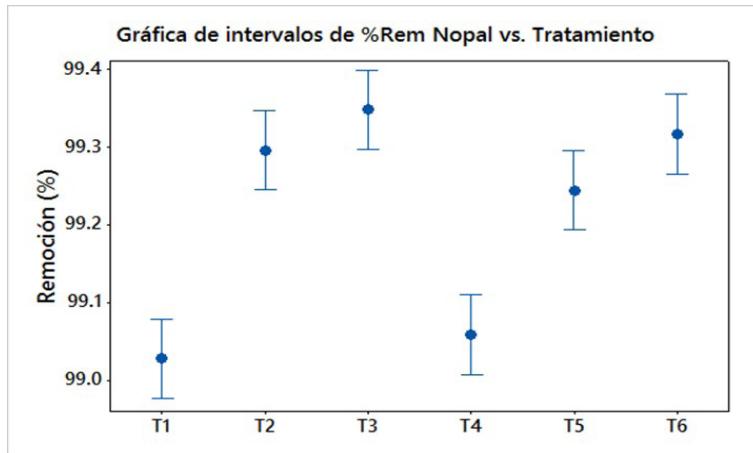


Figura 12. Diagrama de medias para la remoción del coagulante de Nopal

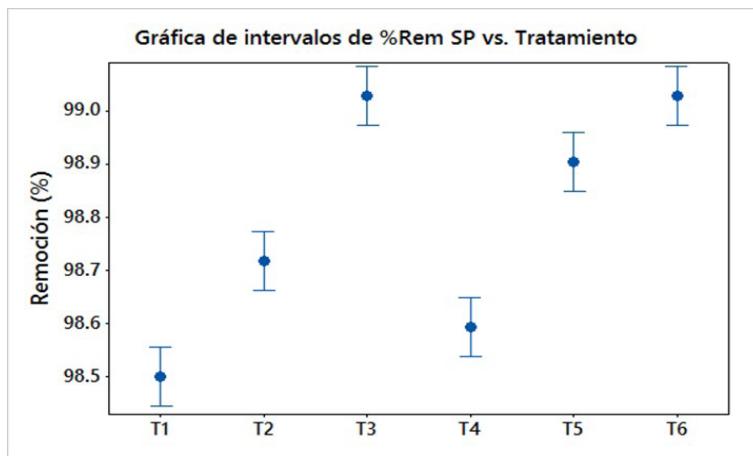


Figura 13. Diagrama de medias para la remoción del coagulante San Pedro

En el análisis de efectos e interacciones mostrados en la Tabla 8, se observó que la adición de almidón mostro efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$) es decir que el incremento de coagulante de la variedad Nopal reportó en aumento de la remoción este mismo hecho se puede observar en la Figura 14, mientras que la velocidad de agitación no mostro efecto significativo ($p\text{-value} > 0.05$), es decir al incrementar la velocidad no se reporta una variación significativa de la remoción, por lo que el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos depende en gran parte de la dosis de coagulante.

Por otra parte, para la variedad San Pedro se observó que la dosis de coagulante mostro un alto efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$, Tabla 8), es decir el incremento de coagulante incide directamente en la remoción de sólidos suspendidos del agua residual,

del mismo modo la velocidad de agitación muestra efecto significativo positivo (p -value < 0.05 , Tabla 8), aunque el incremento de remoción es ligero, tal como se aprecia en la Figura 15.

Fuente	p-value	
	Nopal	San Pedro
Coagulante	0.000	0.000
RPM	0.387	0.001
Coagulante*RPM	0.228	0.011

Tabla 8: ANOVA para efectos e interacción para la remoción

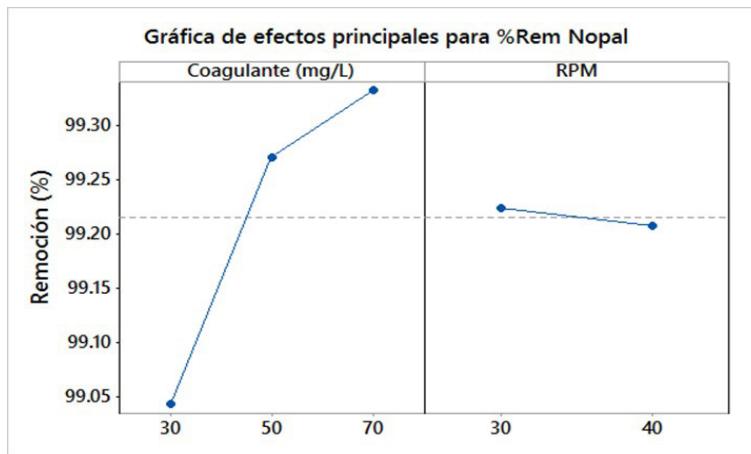


Figura 14. Efectos para la remoción del coagulante de Nopal

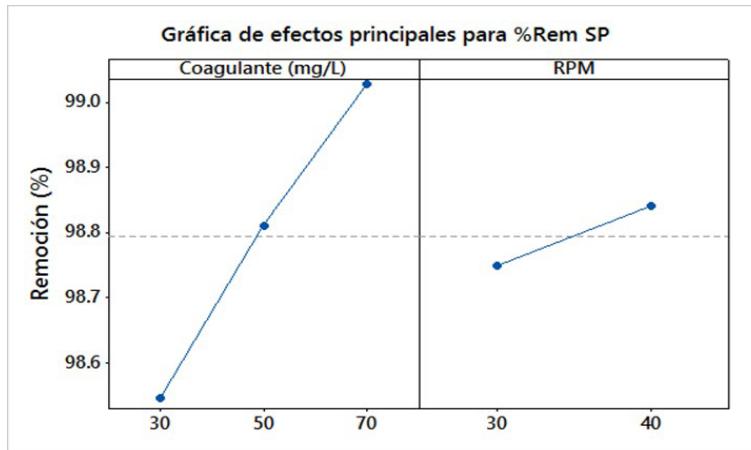


Figura 15. Efectos para la AF del coagulante San Pedro

Asimismo se pude observar que la interacción Coagulante*RPM para el coagulante de la variedad Nopal no presentan interacción significativa (p -value > 0.05 , Tabla 8), es decir el efecto combinado no mejora el porcentaje de remoción, este hecho se puede observar cuando las líneas de velocidad a diferentes concentración son similares tal como se aprecia en la Figura 16, no obstante este hecho es diferente para el mucilago San Pedro donde se aprecia que las líneas de velocidad a diferentes concentración son diferentes (p -value < 0.05), tal como se muestra en la Figura 17.

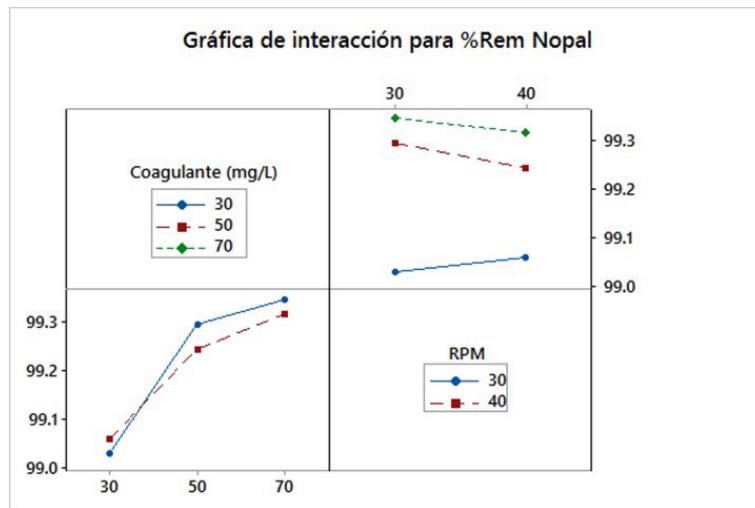


Figura 16. Interacciones para la remoción del coagulante de Nopal

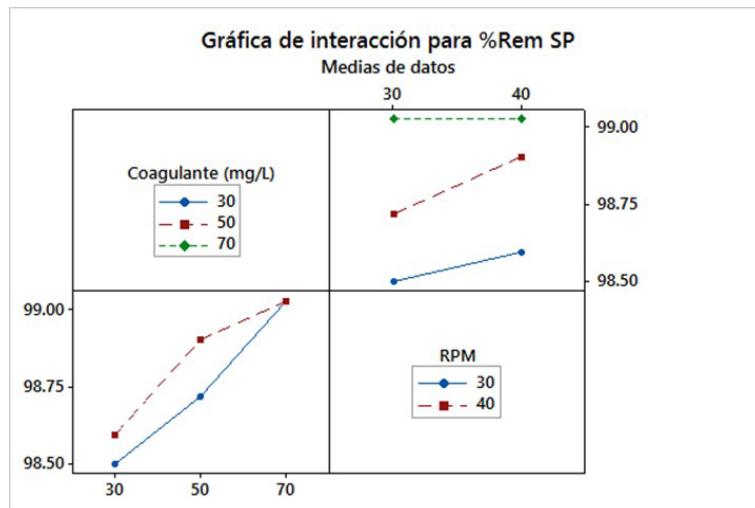


Figura 17. Interacciones para la remoción del coagulante San Pedro

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA TRATADA

pH del agua tratada

Los valores del pH del agua tratada se reportan en la Tabla 9, en ella se aprecia que tras adicionar el coagulante de la variedad Nopal el pH presento diferencias significativas entre tratamientos (p-value < 0.05) cuyos valores oscilaron entre 6.35 a 6.55, mientras que al someter el coagulante San Pedro se aprecio que el pH de los tratamientos son diferentes estadísticamente (p-value < 0.05), reportándose valores que osciló entre 6.69 a 6.90.

Por otra parte se aprecio que el pH del agua tratada con el coagulante Nopal para T1, T2, T4 y T5 son mayores e iguales entre ellos (letras iguales en la Tabla 9), mientras que los tratamiento T3 y T6 mostraron pH más bajos e iguales entre sí, tal como se aprecia en la Figura 18; en tanto para el agua trata con coagulante San Pedro el pH oscilo entre 6.69 a 6.90, mostrando diferencia significativa, asimismo se observó que el pH en ambos casos es ligeramente ácido, aunque más bajo para el agua tratada con coagulante Nopal, este hecho se observa en la Figura 19.

Tratamiento	Coagulante (mg/L)	RPM	Nopal					San Pedro				
			\bar{X}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*	\bar{X}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*
T1	30	30	6.55	\pm	0.02	0.31	A	6.90	\pm	0.03	0.38	A
T2	50	30	6.50	\pm	0.02	0.31	A	6.74	\pm	0.02	0.23	B,C
T3	70	30	6.35	\pm	0.03	0.40	B	6.71	\pm	0.03	0.38	C
T4	30	40	6.55	\pm	0.02	0.23	A	6.80	\pm	0.02	0.22	B
T5	50	40	6.54	\pm	0.02	0.23	A	6.79	\pm	0.01	0.17	B
T6	70	40	6.38	\pm	0.03	0.47	B	6.69	\pm	0.02	0.30	C
Inicial						7.87						

Tabla 9: pH del agua tratada

*Diferencia significativa, evaluado con el test de Tukey al 5% de significancia, Anexo 4.

Donde: \bar{X} es la media aritmética; s, es la desviación estándar, C.V., es el coeficiente de variabilidad

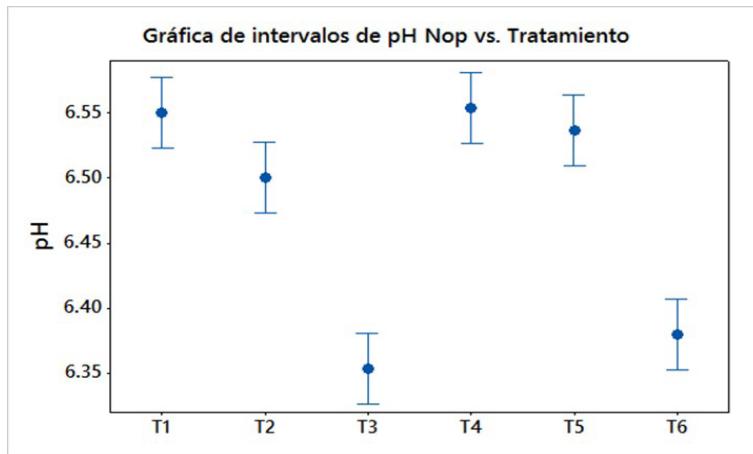


Figura 18. Diagrama de medias para el pH del agua tratada con el coagulante de Nopal

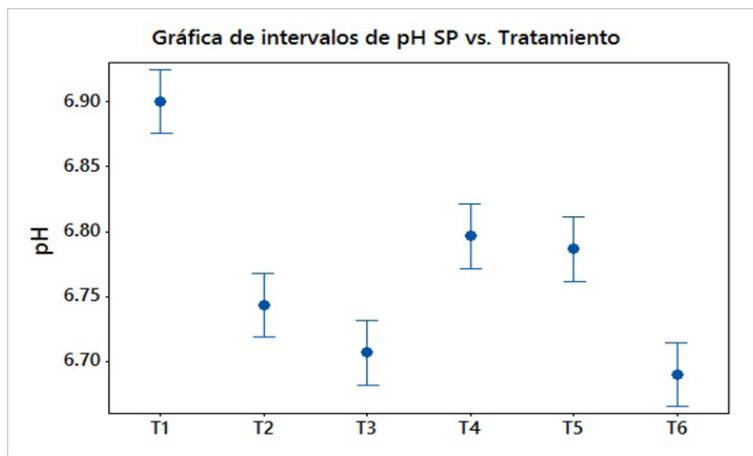


Figura 19. Diagrama de medias para el pH del agua tratada con el coagulante San Pedro

Por otra parte, se observó que la adición de coagulante de la variedad Nopal disminuye notablemente el pH del agua tratada, es decir presenta efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$, Tabla 10), del mismo modo sucedió con la velocidad de agitación incrementando ligeramente el pH, tal como se puede apreciar en la Figura 20, el mismo hecho se observó para el coagulante San Pedro, tal como se muestra en la Figura 21.

Fuente	p-value	
	Nopal	San Pedro
Coagulante	0.000	0.000
RPM	0.050	0.018
Coagulante*RPM	0.417	0.000

Tabla 10: ANOVA para efectos e interacción para el pH del agua tratada

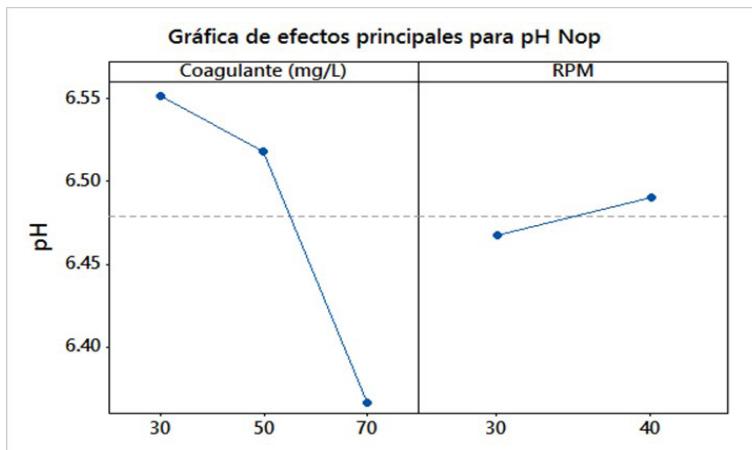


Figura 20. Efectos para el pH del agua tratada con el coagulante de Nopal

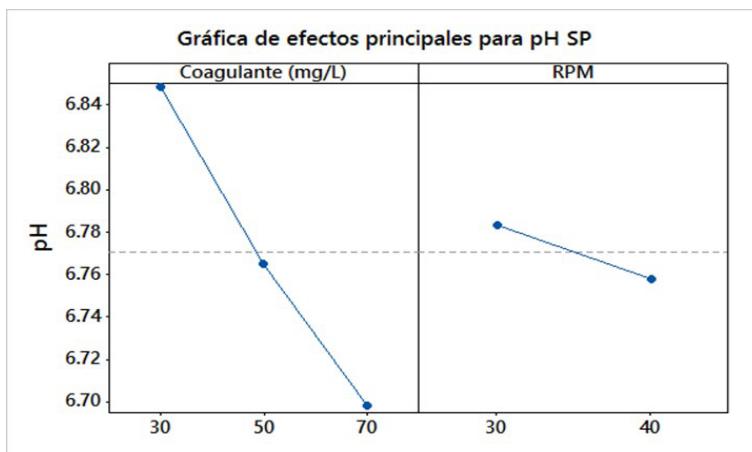


Figura 21. Efectos para el pH del agua tratada con el coagulante San Pedro

La evaluación de la interacción de las variables dependientes sobre el pH, reportaron que para el pH del agua tratada con coagulante Nopal no fue significativo ($p\text{-value} > 0.05$, Tabla 10), tal como se evidencia en la Figura 22; mientras que con la combinación coagulante San Pedro – Velocidad de agitación fue significativa ($p\text{-value} < 0.05$, Tabla 10)

disminuyendo el pH del agua tratada tal como se aprecia en la Figura 23.

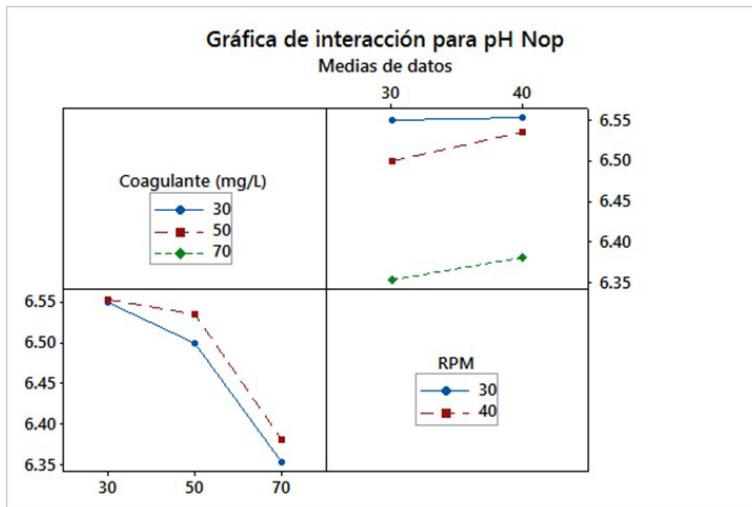


Figura 22. Interacciones para el pH del agua tratada con el coagulante de Nopal

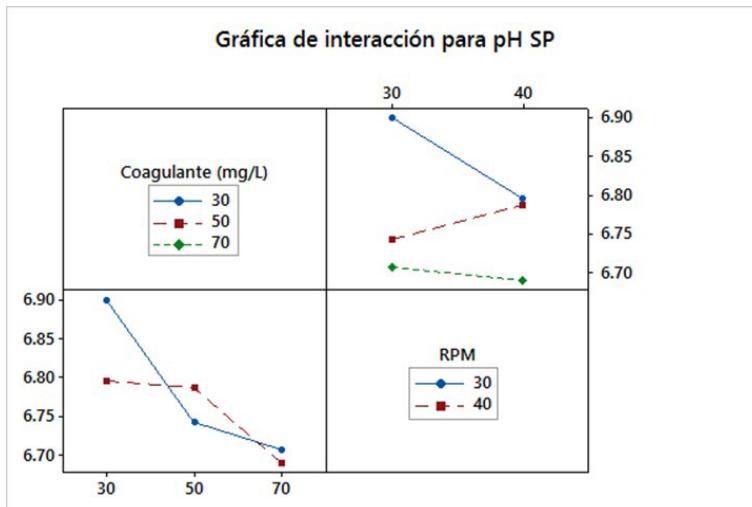


Figura 23. Interacciones para el pH del agua tratada con el coagulante San Pedro

TURBIEDAD DEL AGUA TRATADA

Los resultados de la turbiedad se muestran en la Tabla 11, de ella se deduce que esta varía de 0.21 a 0.30 NTU para el agua tratada con el coagulante de Nopal, no obstante se observó que para los diferentes tratamientos presenta diferencia significativa (p -value < 0.05), mientras que la turbiedad del agua tratada con el coagulante San Pedro oscila entre

0.31 a 0.48 NTU mostrando diferencias significativas (p -value < 0.05) entre tratamientos.

Tratamiento	Coagulante (mg/L)	RPM	Nopal					San Pedro				
			\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*	\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*
T1	30	30	0.31	\pm	0.02	6.64	B	0.48		0.02	3.16	D
T2	50	30	0.23	\pm	0.02	6.74	A	0.41		0.02	3.70	C
T3	70	30	0.21	\pm	0.01	4.76	A	0.31		0.02	4.88	A
T4	30	40	0.30	\pm	0.01	3.81	B	0.45		0.02	3.37	D
T5	50	40	0.24	\pm	0.01	2.37	A	0.35		0.02	4.32	B
T6	70	40	0.22	\pm	0.01	4.55	A	0.31		0.01	1.84	A
Inicial						0.2						

Tabla 11: Turbiedad (NTU) del agua tratada

*Diferencia significativa, evaluado con el test de Tukey al 5% de significancia, Anexo 5.

Donde: \bar{x} es la media aritmética; s es la desviación estándar, C.V. es el coeficiente de variabilidad

Del mismo modo se observó que el tratamiento de T1 y T4 para el agua tratada con coagulante Nopal reportaron turbiedades similares del agua tratada (Letras iguales en la Tabla 11) siendo éstas mayores, mientras que los tratamientos T2, T3, T5 y T6 reportaron turbiedades bajas siendo éstas similares (Letras iguales en la Tabla 11), este mismo hecho se puede observar en la Figura 24, mientras que para el coagulante San Pedro los tratamientos T3 y T6 reportaron turbiedades similares y los tratamientos T1 y T4 valores mayores, tal como se aprecia en la Figura 25.

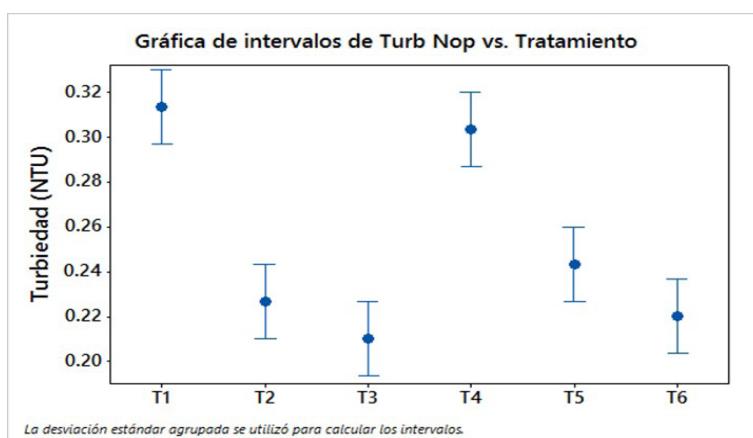


Figura 24. Diagrama de medias para la turbiedad del agua tratada con el coagulante de Nopal

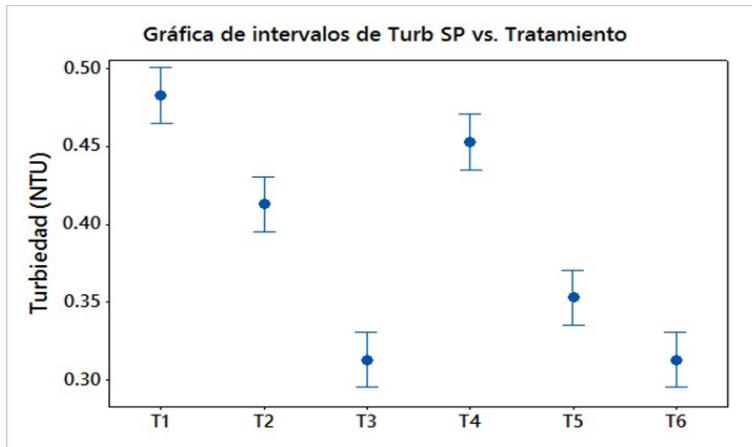


Figura 25. Diagrama de medias para la turbiedad del agua tratada con el coagulante San Pedro

Por otra parte en la Figura 26, se los efectos de las variables independientes en la turbiedad del agua tratada con el coagulante Nopal, de ella se aprecia que el incremento de la dosis de coagulante muestra efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$, Tabla 12), disminuyendo la turbiedad, mientras que la velocidad de remoción no muestra efecto significativo ($p\text{-value} > 0.05$, Tabla 12), es decir el aumento de la velocidad no mejora la turbiedad del agua tratada.

Asimismo, el comportamiento del coagulante San Pedro, la dosis de coagulante muestra efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$, Tabla 12), es decir el aumento de dosis de coagulante disminuye la turbiedad, este mismo hecho presenta la velocidad de remoción, aunque la disminución no es notoria, tal como se aprecia en la Figura 27, es decir la recta presentan baja pendiente.

Fuente	p-value	
	Nopal	San Pedro
Coagulante	0.000	0.000
RPM	0.387	0.001
Coagulante*RPM	0.228	0.011

Tabla 12: ANOVA para efectos e interacción para la turbiedad del agua tratada

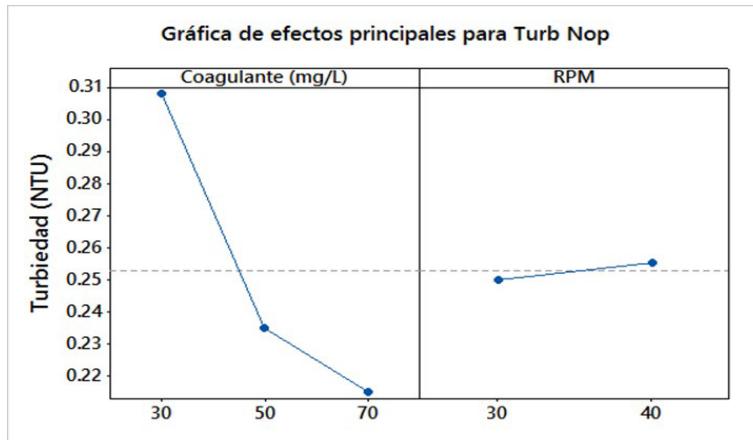


Figura 26. Efectos para la turbiedad del agua tratada con el coagulante de Nopal

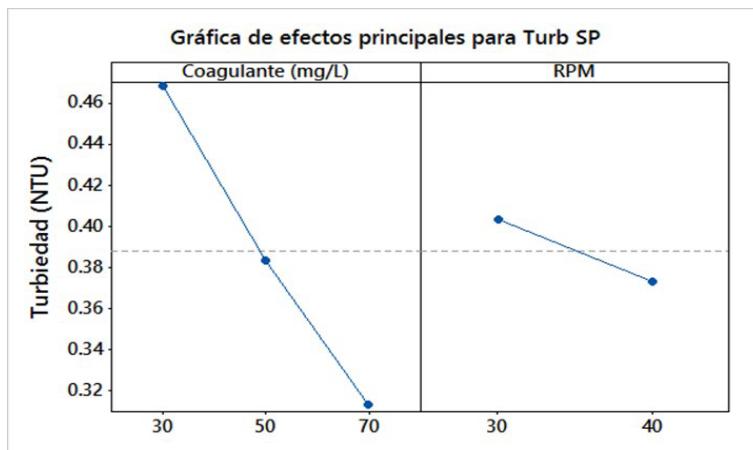


Figura 27. Efectos para la turbiedad del agua tratada con el coagulante San Pedro

Respecto a las interacciones de las variables independientes (Coagulante*RPM), se observó que para el coagulante de la variedad Nopal esta no presenta interacción significativa ($p\text{-value} > 0.05$, Tabla12), es decir el efecto combinado de ambas variables reporta el mismo valor de turbiedad, este hecho se puede observar en la Figura 28, en tanto que la interacción para el coagulante San Pedro es significativa ($p\text{-value} < 0.05$, Tabla12), tal como se aprecia en la Figura 29.

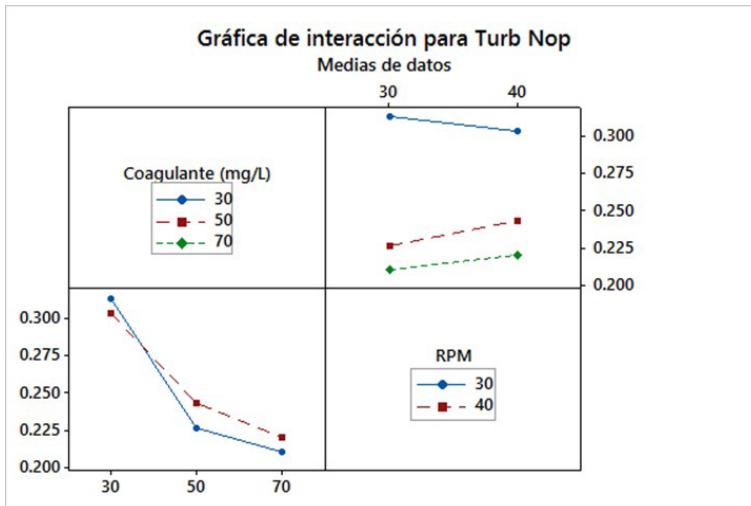


Figura 28. Interacciones para la turbiedad del agua tratada con el coagulante de Nopal

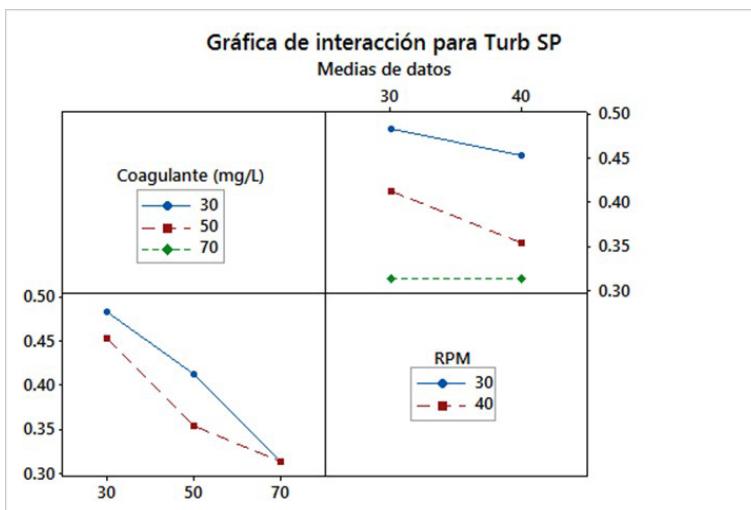


Figura 29. Interacciones para la turbiedad del agua tratada con el coagulante San Pedro

DUREZA DEL AGUA TRATADA

Los resultados de la dureza en mg CaCO_3/L se muestran en la Tabla 13, de ella se desprende que el agua tratada con el coagulante Nopal reportó valores que oscilan entre 165 a 171 mg/L, presentando diferencia significativa entre ellos ($p\text{-value} < 0.05$, Letras diferentes), por otra parte para el coagulante San Pedro oscilo entre 187.67 a 193.67 mg/L del mismo mostró diferencia significativa entre tratamientos ($p\text{-value} < 0.05$. Letras diferentes).

Asimismo, en la Tabla 13, se puede apreciar que para el coagulante Nopal el tratamiento T3 (70 mg/L y 30 rpm) y T6 reportaron similares valores de dureza, siendo estos los menores, mientras que los demás tratamientos reportaron durezas relativamente más altas, tal como se aprecia en la Figura 30; en tanto que para el coagulante San Pedro sucedió de la misma manera, este hecho se puede observar en la Figura 31.

Tratamiento	Coagulante (mg/L)	RPM	Nopal					San Pedro				
			\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*	\bar{x}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*
T1	30	30	171.00	\pm	1.00	0.58	A	193.67		2.52	1.30	A
T2	50	30	167.67	\pm	1.53	0.91	A,B	191.33		2.08	1.09	A,B
T3	70	30	165.67	\pm	1.53	0.92	B	188.00		2.00	1.06	B
T4	30	40	170.67	\pm	1.53	0.90	A	192.00		1.00	0.52	A,B
T5	50	40	167.33	\pm	2.08	1.24	A,B	191.00		1.00	0.52	A,B
T6	70	40	165.00	\pm	1.00	0.61	B	187.67		2.08	1.11	B
Inicial						231.0						

Tabla 13: Dureza (mg CaCO₃/L) del agua tratada

*Diferencia significativa, evaluado con el test de Tukey al 5% de significancia, Anexo 6.

Donde: \bar{x} es la media aritmética; s, es la desviación estándar; C.V., es el coeficiente de variabilidad

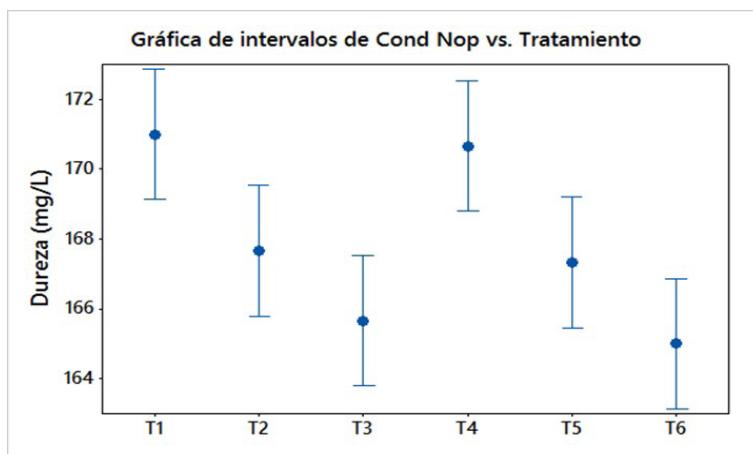


Figura 30. Diagrama de medias para la dureza del agua tratada con el coagulante de Nopal

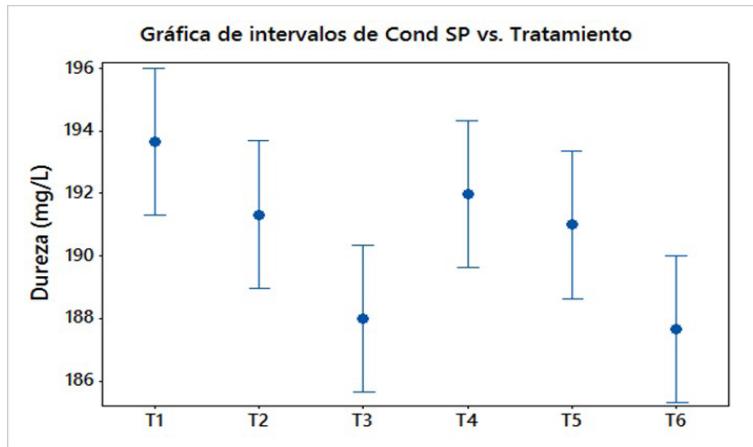


Figura 31. Diagrama de medias para la dureza del agua tratada con el coagulante San Pedro

Por otra parte la evaluar los efectos individuales de las variables independientes en la dureza, se observó que al adición del coagulante nopal reporto efecto significativo considerable ($p\text{-value} < 0.05$, Tabla 14), es decir que la adición del coagulante disminuye la dureza de agua tratada tal como se aprecia en la Figura 32 y Figura 33, por otra parte se observó que la velocidad de agitación no muestra efecto significativo ($p\text{-value} > 0.05$) en la dureza del agua tratada con coagulante Nopal, es decir el cambio de la velocidad de agitación no incrementa considerablemente la dureza del agua tratada; por el contrario para el coagulante San Pedro se observa que si muestra efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$, Tabla 14), disminuyendo la dureza tal como se aprecia en la Figura 33.

Del mismo modo, el análisis de la interacción de variables no fue significante ($p\text{-value} > 0.05$, Tabla 14) para el coagulante Nopal, en tanto que para el coagulante San Pedro las variables si muestran interacción significativa ($p\text{-value} < 0.05$), es decir existe sinergia de las variables que permiten disminuir la dureza del agua tratada.

Fuente	p-value	
	Nopal	San Pedro
Coagulante	0.000	0.000
RPM	0.387	0.001
Coagulante*RPM	0.228	0.011

Tabla 14: ANOVA para efectos e interacción para la dureza del agua tratada

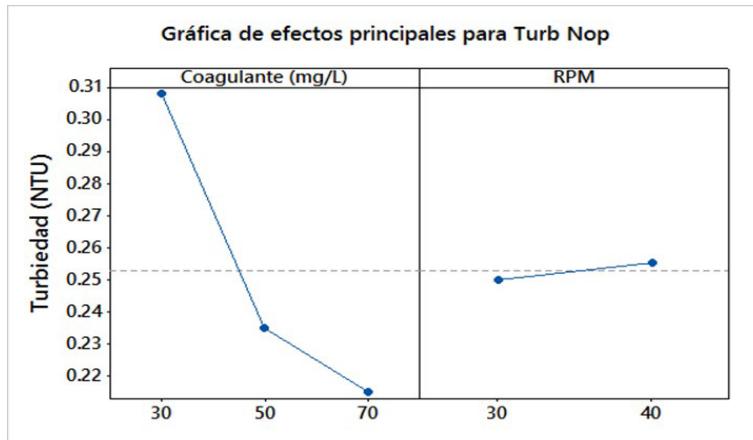


Figura 32. Efectos para la dureza del agua tratada con el coagulante de Nopal

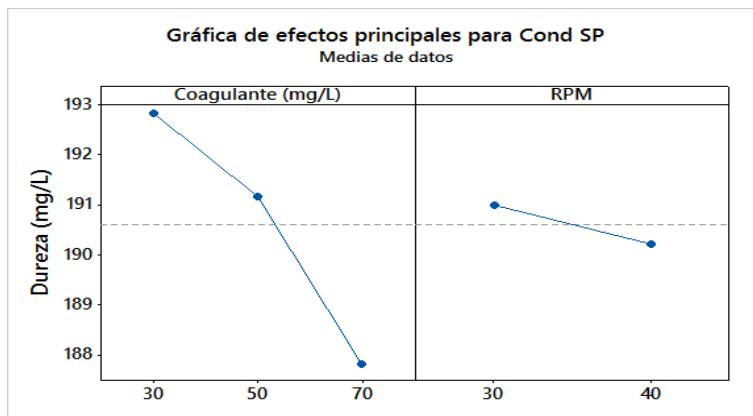


Figura 33. Efectos para la dureza del agua tratada con el coagulante San Pedro

CONDUCTIVIDAD

Los resultados de la conductividad del agua tratada se presentan en la Tabla 15, en ella se observa que para el agua tratada con coagulante Nopal, la conductividad reporta diferentes resultados para los tratamientos, mostrando diferencia significativa (p -value < 0.05), agrupándose en un grupo con conductividad similar y más baja T2, T3, T5 y T6 (letras iguales), mientras que los tratamientos T1 y T4 reportaron valores de conductividad más altos y similares entre sí, el cual se observa en la Figura 34, por otra parte para el agua tratada con el coagulante San Pedro se observó que T3 y T6 reportaron los valores más bajos, mientras que los tratamientos T1 y T4 mostraron conductividad más alta, tal como se aprecia en la Figura 35.

Tratamiento	Coagulante (mg/L)	RPM	Nopal						San Pedro					
			\bar{X}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*	\bar{X}	\pm	s	C.V. (%)	Dif. Sig.*		
T1	30	30	412.00	\pm	2.65	0.64	A	459.33	\pm	1.53	0.33	A		
T2	50	30	398.67	\pm	2.08	0.52	B	455.67	\pm	1.15	0.25	B,C		
T3	70	30	396.00	\pm	1.00	0.25	B	453.00	\pm	1.00	0.22	C		
T4	30	40	409.67	\pm	1.53	0.37	A	460.00	\pm	1.00	0.22	A		
T5	50	40	399.00	\pm	1.00	0.25	B	458.33	\pm	1.53	0.33	A,B		
T6	70	40	396.33	\pm	1.53	0.39	B	453.67	\pm	1.15	0.25	C		
Inicial								523.0						

Tabla 15: Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del agua tratada

*Diferencia significativa, evaluado con el test de Tukey al 5% de significancia, Anexo 7.

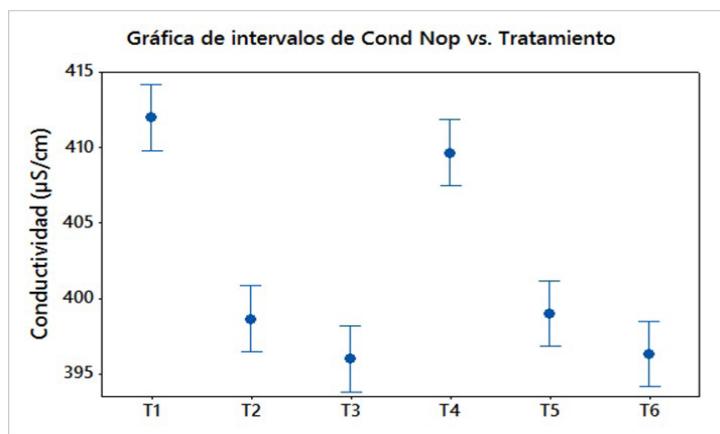


Figura 34. Diagrama de medias para la conductividad del agua tratada con el coagulante de Nopal

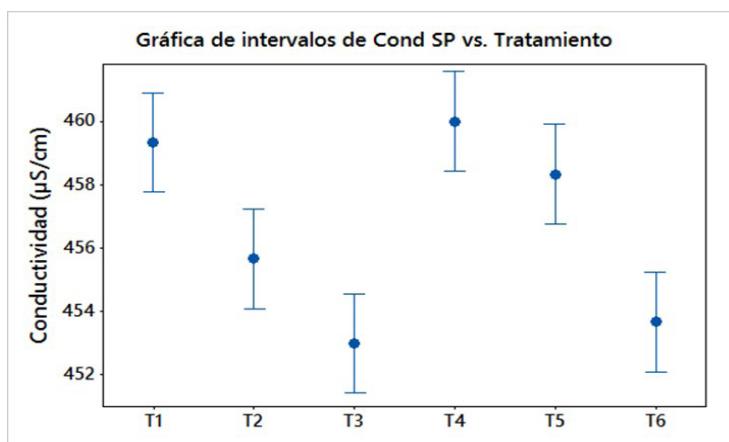


Figura 35. Diagrama de medias para la conductividad del agua tratada con el coagulante San Pedro

Por otra parte al evaluar el efecto de las variables independientes (coagulante y velocidad de agitación), se observó que el coagulante presento efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$, Taabla 16) para ambos coagulantes, es decir la adición de coagulante permite la disminución de la conductividad del agua tratada en comparación con la inicial, tal como se evidencia en la Figura 36 y Figura 37, del mismo modo la velocidad de agitación (rpm) reporta efecto significativo en la conductividad ($p\text{-value} < 0.05$, tabla 16), es así que para el coagulante Nopal sucede disminución de la conductividad cuando se incrementa la velocidad de agitación (Figura 36), mientras que el agua tratada con coagulante San Pedro esta es inversa, tal como se muestra en la Figura 37.

Asimismo, el análisis de las interacciones, se observó que el efecto combinado de coagulante-velocidad para el agua tratada con coagulante Nopal no reporta interacción significativa ($p\text{-value} > 0.05$), mientras que lo contrario sucede con el coagulante San Pedro ($p\text{-value} < 0.05$), tal como se aprecia en la Tabla 16.

Fuente	p-value	
	Nopal	San Pedro
Coagulante	0.000	0.000
RPM	0.387	0.001
Coagulante*RPM	0.228	0.011

Tabla 16: ANOVA para efectos e interacción para la conductividad del agua tratada

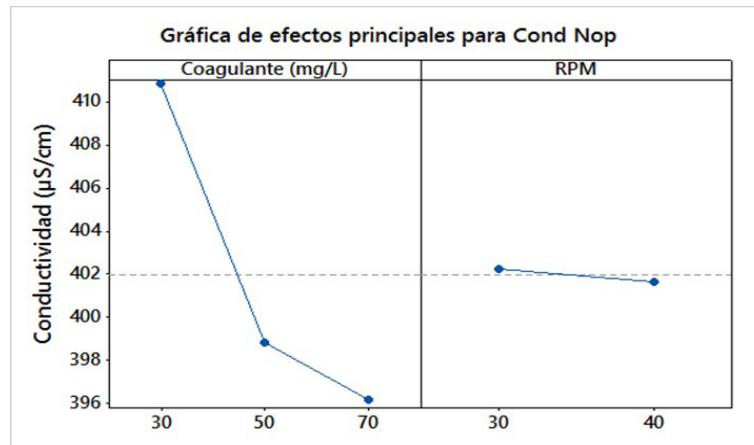


Figura 36. Efectos para la conductividad del agua tratada con el coagulante de Nopal

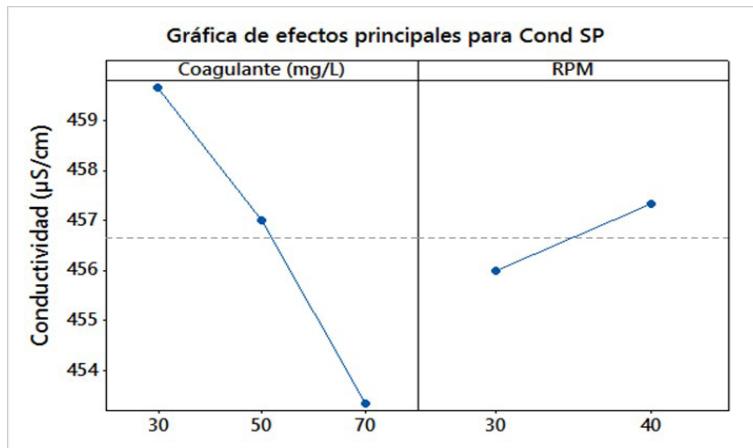


Figura 37. Efectos para la conductividad del agua tratada con el coagulante San Pedro

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE LA CAPACIDAD FLOCULANTE

Para la optimización de la capacidad floculante se ajustó diferentes ecuaciones lineales y no lineales, para la actividad floculante (AF), porcentaje de remoción (%R), así como de los parámetros de estudio del agua tratada como: pH, Turbiedad (T), Dureza (D) y Conductividad (Cond) para las dos variedades de coagulantes naturales, el ajuste de los modelos se realizó a través del Software Statisitca V8 (2007), considerando un nivel de significancia del 5%.

MODELOS PARA LA CAPACIDAD COAGULANTE DEL NOPAL

Actividad floculante (af)

Los modelos matemáticos evaluados para la actividad floculante en base a coeficiente de ajuste R^2 se muestran en la Tabla 17, de ella se desprende que el Modelo 2, presento mejor ajuste, $R^2 = 0.865$, es decir se trata de un modelo factorial, cuya superficie de respuesta graficada se observa en la Figura 38, de ella se observa que altos niveles de coagulante incrementan la actividad floculante, mientras que la velocidad no es tan significativa.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	51.178	15.889	41.106	5.817
C	0.630	1.335	1.080	1.786
C^2			-0.005	-0.005
RPM	-0.341	0.667	-0.341	0.667
RPM^2				
$C \cdot RPM$		-0.020		-0.020
R^2	0.849	0.865	0.846	0.862

Tabla 17: Modelos matemáticos para la AF del coagulante Nopal

$$AF = 5.8 + 1.786 \cdot X + 0.667 \cdot Y - 0.00451 \cdot X^2 - 0.0202 \cdot X \cdot Y$$

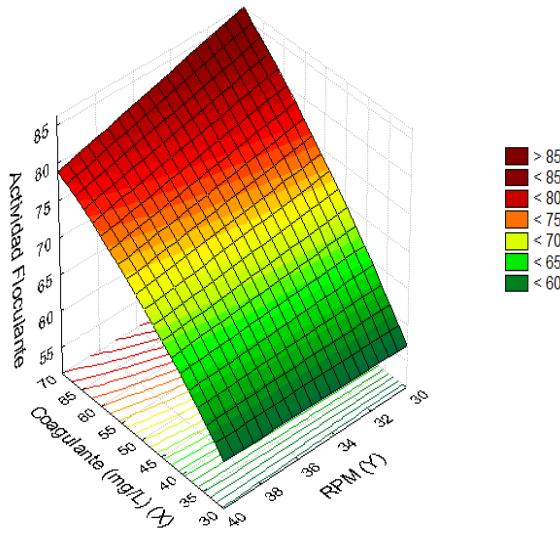


Figura 38. Superficie de respuesta para la AF del coagulante de Nopal

Porcentaje de remoción (%R)

Los modelos evaluados para %R, se muestran en la Tabla 18, de ella se desprende el Modelo 4 quien presento un coeficiente de ajuste $R^2 = 0.903$, este se trata de un modelo cuadrático con interacción, cuya superficie de respuesta se presenta en la Figura 39, observándose que mayores concentraciones de coagulante de nopal permiten reportar mejor %R, aunque las velocidades de agitación no presentan mejor respuesta.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	98.914	98.643	98.452	98.181
C	0.007	0.013	0.028	0.033
C^2			0.000	0.000
RPM	-0.002	0.006	-0.002	0.006
RPM^2				
$C \cdot RPM$		0.000		0.000
R^2	0.804	0.802	0.899	0.903

Tabla 18: Modelos matemáticos para la %R del coagulante Nopal

$$\text{Función} = 99.10001 + 0.000003 \cdot x - 0.00021 \cdot y + 2 \cdot 0.00003 \cdot z - 0.00010 \cdot x \cdot y +$$

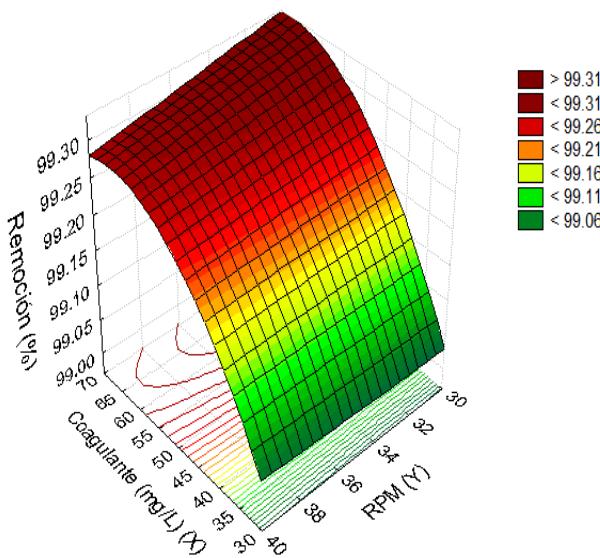


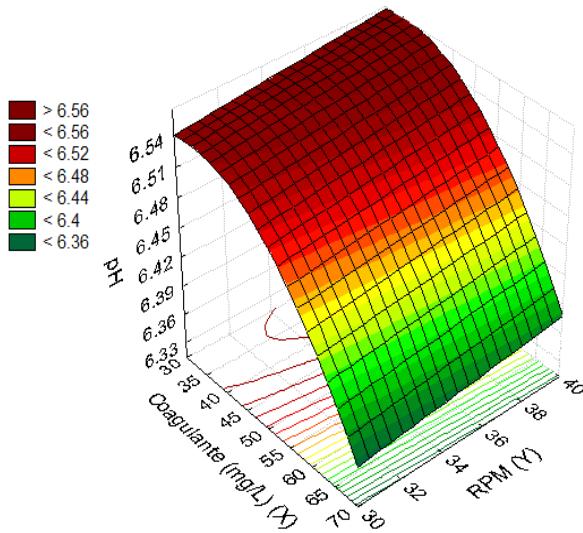
Figura 39. Superficie de respuesta para la remoción del coagulante de Nopal

pH

Los modelos matemáticos evaluados para el pH del agua tratada se muestran en la Tabla 19, de ella se desprende que Modelo 3, reporto mejor coeficiente de ajuste $R^2 = 0.937$, es así que se trata de un modelo cuadrático, cuya superficie de respuesta se muestra en la Figura 40, observándose que únicamente el incremento del coagulante Nopal permite disminuir el pH, mientras que la velocidad de agitación no contribuye en la variación del pH.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	6.632	6.734	6.302	6.404
C	-0.005	-0.007	0.010	0.008
C^2			0.0001	0.0001
RPM	0.002	-0.001	0.002	-0.001
RPM^2				
$C \cdot RPM$		0.0001		0.0001
R^2	0.815	0.806	0.937	0.936

Tabla 19: Modelos matemáticos para el pH del coagulante Nopal



$$\text{Function} = 6.302014 + 0.010167 * X - 0.000148 * X^2 + 0.002222 * Y$$

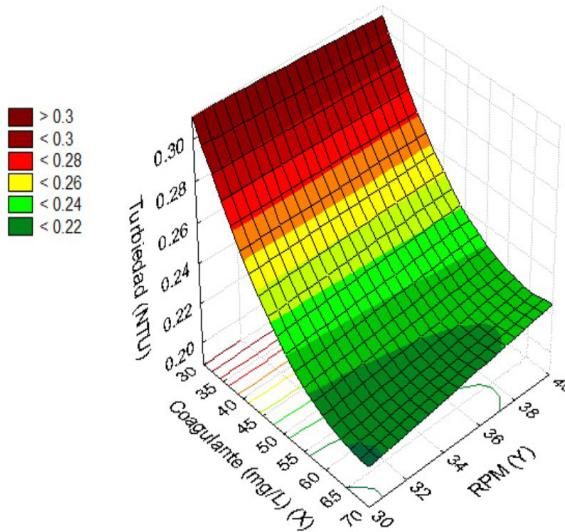
Figura 40. Superficie de respuesta para el pH del agua tratada con el coagulante Nopal

Turbidez

En cuanto a la turbidez del agua tratada, los modelos matemáticos evaluados muestran en la Tabla 19, de ella se desprende que Modelo 4, reporto mejor coeficiente de ajuste $R^2 = 0.937$, cuya ecuación corresponde a una cuadrática con interacción, la cual se encuentra representada en la Figura 41, donde se puede apreciar que dosis altas de coagulante de Nopal disminuyen la turbiedad del agua, estando influenciado ligeramente por la velocidad de remoción, ya que a valores bajos sucede menor turbiedad del agua tratada.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	0.35000	0.43750	0.49889	0.58639
C	-0.00233	-0.00408	-0.00900	-0.01075
C^2			0.00007	0.00007
RPM	0.00056	-0.00194	0.00056	-0.00194
RPM^2				
$C * RPM$		0.00005		0.00005
R^2	0.804	0.802	0.899	0.903

Tabla 20: Modelos matemáticos para el pH del agua tratada con el coagulante Nopal



$$\text{Function} = 0.586389 - 0.010750 * X + 0.000067 * X^2 - 0.001944 * Y + 0.000050 * X * Y$$

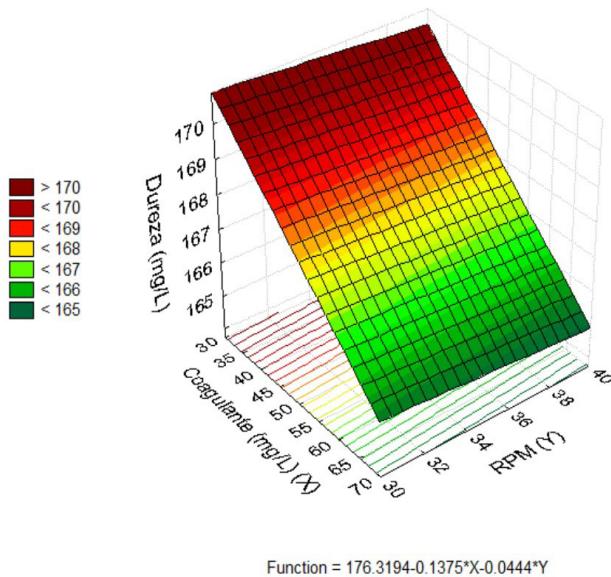
Figura 41. Superficie de respuesta para la turbiedad del agua tratada con el coagulante Nopal

Dureza

Los modelos matemáticos estudiados para la dureza del agua tratada se presentan en la Tabla 21, de ella se desprende que el Modelo 1 reporto mejor coeficiente de ajuste $R^2 = 0.734$, el cual corresponde a una ecuación simple, cuya superficie e respuesta se representa en la Figura 42, de ella se puede indicar que el incremento de dosis de coagulante de Nopal disminuye la dureza, mientras que la velocidad de agitación no influye considerablemente.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	176.3194	174.8611	179.5764	178.1181
C	-0.1375	-0.1083	-0.2833	-0.2542
C^2			0.0015	0.0015
RPM	-0.0444	-0.0028	-0.0444	-0.0028
RPM^2				
$C * RPM$		-0.0008		-0.0008
R^2	0.734	0.716	0.729	0.709

Tabla 21: Modelos matemáticos para la dureza del agua tratada con el coagulante Nopal



$$\text{Function} = 176.3194 - 0.1375 \times X - 0.0444 \times Y$$

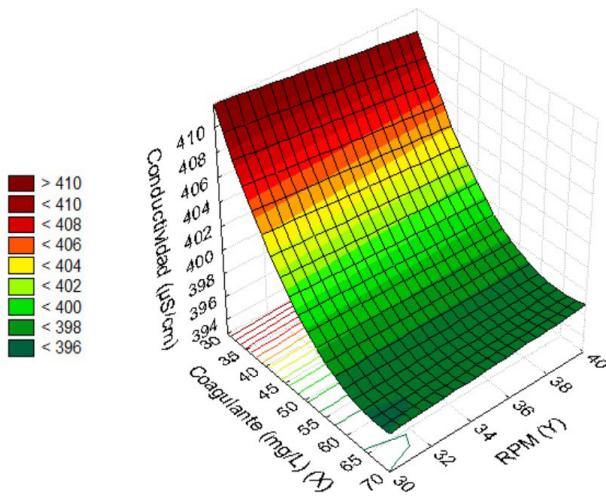
Figura 42. Superficie de respuesta para la dureza del agua tratada con el coagulante Nopal

Conductividad

Los modelos matemáticos estudiados para la conductividad del agua tratada se presentan en la Tabla 22, de ella se desprende que el Modelo 4 representa mejor al comportamiento de la turbiedad puesto que el coeficiente de ajuste $R^2 = 0.936$, tratándose de un modelo cuadrático con interacción, cuya representación de su superficie de respuesta se muestra en la Figura 43, observándose que a mayores dosis de coagulante disminuye considerablemente la conductividad del agua tratada, mientras que la velocidad de agitación no influye en esta.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	422.2222	433.8889	448.2778	459.9444
C	-0.3667	-0.6000	-1.5333	-1.7667
C^2			0.0117	0.0117
RPM	-0.0556	-0.3889	-0.0556	-0.3889
RPM^2				
$C \times RPM$		0.0067		0.0067
R^2	0.810	0.805	0.933	0.936

Tabla 22: Modelos matemáticos para la conductividad del agua tratada con el coagulante Nopal



$$\text{Function} = 459.9444 - 1.7667 \times X + 0.0117 \times X^2 - 0.3889 \times Y + 0.0067 \times X \times Y$$

Figura 43. Superficie de respuesta para la conductividad del agua tratada con el coagulante Nopal

MODELOS PARA LA CAPACIDAD DEL COAGULANTE SAN PEDRO

Actividad floculante (AF)

Los modelos matemáticos evaluados para la actividad floculante del coagulante San Pedro en base a coeficiente de ajuste R^2 se muestran en la Tabla 23, de ella se desprende que el Modelo 4, presento mejor ajuste, $R^2 = 0.793$, es decir se trata de un modelo cuadrático con interacción, cuya superficie de respuesta graficada se observa en la Figura 44, de ella se observa que el incremento de coagulante San Pedro y bajas velocidades de agitación incrementan la actividad floculante

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	50.7134	-14.6040	67.8283	2.5109
C	0.3126	1.6189	-0.4538	0.8526
C^2			0.0077	0.0077
RPM	-0.4183	1.4479	-0.4183	1.4479
RPM^2				
$C \times RPM$		-0.0373		-0.0373
R^2	0.561	0.756	0.581	0.793

Tabla 23: Modelos matemáticos para la AF del coagulante San Pedro

$$\text{Function} = 2.510887 + 0.852577 \times X + 0.007663 \times X^2 + 1.447920 \times Y - 0.037324 \times X \times Y$$

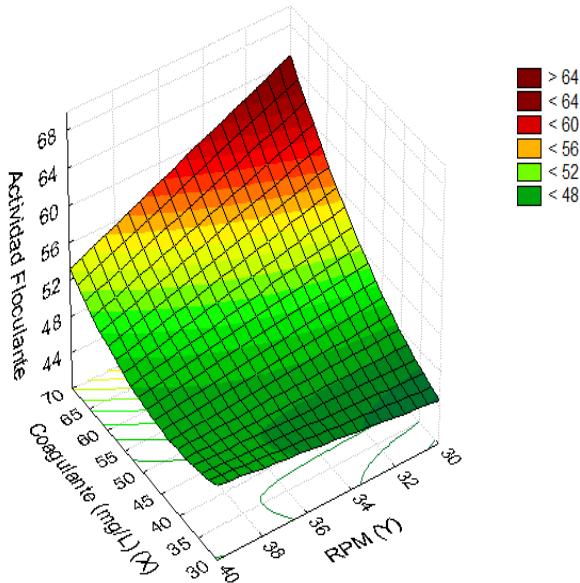


Figura 44. Superficie de respuesta para la AF del coagulante San Pedro

Porcentaje de remoción (%R)

Los modelos evaluados para %R, se muestran en la Tabla 24, de ella se desprende el Modelo 2 es el que se ajusta mejor, puesto que presento un coeficiente de ajuste $R^2 = 0.931$, este se trata de un modelo factorial, cuya superficie de respuesta se presenta en la Figura 45, observándose que mayores concentraciones de coagulante San Pedro y bajas velocidades de agitación reportar mejor %R.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	97.8682	97.4610	97.7383	97.3310
C	0.0120	0.0202	0.0178	0.0260
C^2			-0.0001	-0.0001
RPM	0.0093	0.0209	0.0093	0.0209
RPM^2				
$C \times RPM$		-0.0002		-0.0002
R^2	0.926	0.931	0.924	0.929

Tabla 24: Modelos matemáticos para la %R del coagulante San Pedro

$$\text{Function} = 97.46096 + 0.02017X + 0.02094Y - 0.00023XY$$

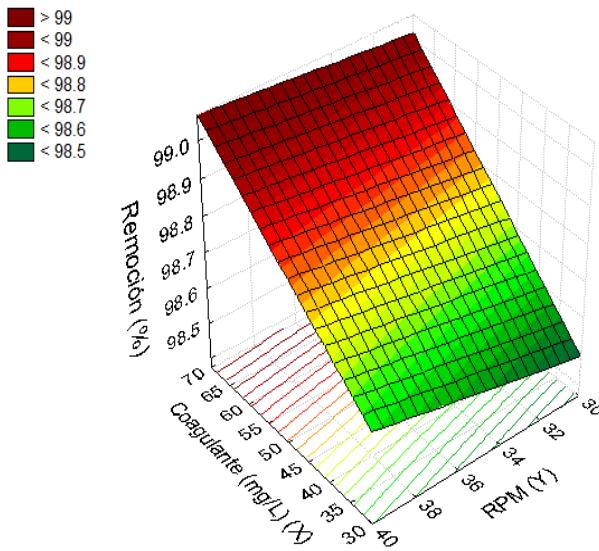


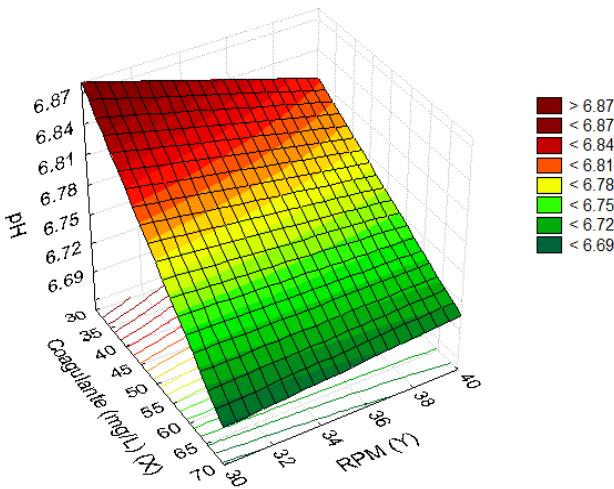
Figura 45. Superficie de respuesta para la remoción del coagulante San Pedro

pH

Los modelos matemáticos evaluados para el pH del agua tratada se muestran en la Tabla 19, de ella se desprende que Modelo 2, reportó mejor coeficiente de ajuste $R^2 = 0.793$, tratándose de un modelo factorial, cuya superficie de respuesta se muestra en la Figura 46, observándose que únicamente el incremento del coagulante San Pedro permite disminuir el pH, mientras que la velocidad de agitación no contribuye en la variación del pH.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	7.0475	7.4267	7.0940	7.4732
C	-0.0038	-0.0113	-0.0058	-0.0134
C^2			0.0000	0.0000
RPM	-0.0026	-0.0134	-0.0026	-0.0134
RPM^2				
C*RPM		0.0002		0.0002
R^2	0.737	0.793	0.722	0.781

Tabla 25: Modelos matemáticos para el pH del agua tratada con el coagulante San Pedro



$$\text{Function} = 7.426667 - 0.011333 \times X - 0.013389 \times Y + 0.000217 \times X \times Y$$

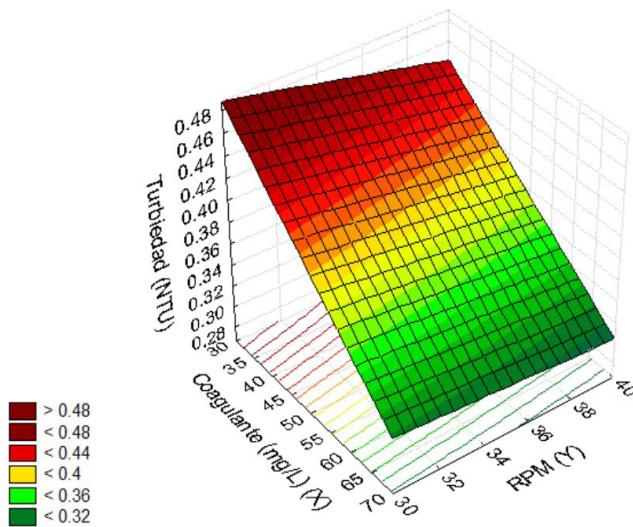
Figura 46. Superficie de respuesta para el pH del agua tratada con el coagulante San Pedro

Turbidez

En cuanto a la turbidez del agua tratada, los modelos matemáticos evaluados muestran en la Tabla 26, de ella se desprende que Modelo 2 se justo adecuadamente, puesto que reporto mejor coeficiente de ajuste $R^2 = 0.931$, cuya ecuación corresponde a una cuadrática con interacción o factorial, la cual se encuentra representada en la Figura 47, donde se puede apreciar que el incremento de la dosis de coagulante de San Pedro disminuyen la turbiedad del agua, estando influenciado ligeramente por la velocidad de remoción, ya que a valores bajos sucede menor turbiedad del agua tratada.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	0.6871	0.8183	0.7290	0.8602
C	-0.0039	-0.0065	-0.0057	-0.0084
C^2			0.00002	0.00002
RPM	-0.0030	-0.0067	-0.0030	-0.0067
RPM^2				
$C \times RPM$		0.0001		0.0001
R^2	0.926	0.931	0.924	0.929

Tabla 26: Modelos matemáticos para la turbidez del agua tratada con el coagulante San Pedro



$$\text{Function} = 0.818333 - 0.006500 \times X - 0.006750 \times Y + 0.000075 \times X \times Y$$

Figura 47. Superficie de respuesta para la turbiedad del agua tratada con el coagulante San Pedro

Dureza

Los modelos matemáticos estudiados para la dureza del agua tratada se presentan en la Tabla 27, de ella se desprende que el Modelo 2 reportó mejor coeficiente de ajuste $R^2 = 0.716$, el cual corresponde a una ecuación factorial, cuya superficie de respuesta se representa en la Figura 48, de ella se puede indicar que el incremento de dosis de coagulante de Nopal disminuye notablemente la dureza, mientras que la velocidad de agitación no influye considerablemente.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	199.5833	174.8611	194.9306	200.7639
C	-0.1250	-0.1083	0.0833	-0.0333
C^2			-0.0021	-0.0021
RPM	-0.0778	-0.0028	-0.0778	-0.2444
RPM^2				
$C \times RPM$		-0.0008		0.0033
R^2	0.575	0.716	0.572	0.553

Tabla 27: Modelos matemáticos para la dureza del agua tratada con el coagulante San Pedro

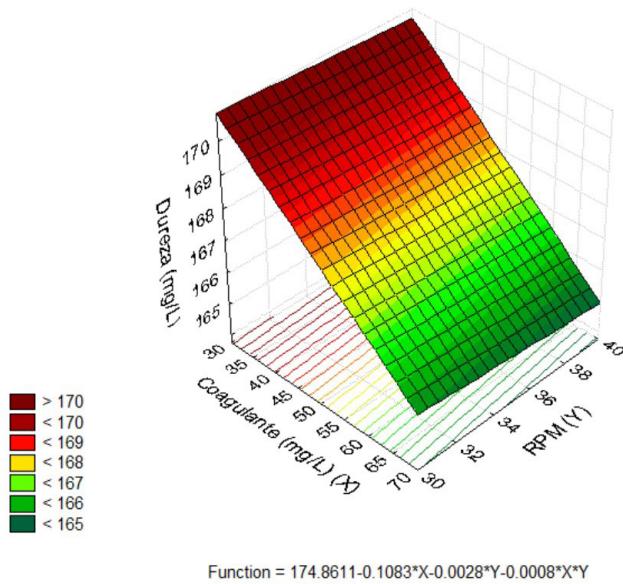


Figura 48. Superficie de respuesta para la dureza del agua tratada con el coagulante San Pedro

Conductividad

Los modelos matemáticos estudiados para la conductividad del agua tratada se presentan en la Tabla 28, de ella se desprende que el Modelo 1 representa mejor al comportamiento de la turbiedad puesto que el coeficiente de ajuste $R^2 = 0,824$, tratándose de un modelo simple, cuya representación de su superficie de respuesta se muestra en la Figura 49, observándose que a mayores dosis de coagulante y bajas velocidades de agitación disminuyen considerablemente la conductividad del agua tratada.

Coeficientes	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto	459.9167	459.9167	457.1250	459.9167
C	-0.1583	-0.1583	-0.0333	-0.1583
C^2			-0.0012	
RPM	0.1333	0.1333	0.1333	0.1333
RPM^2				
$C \cdot RPM$		0.0000		
R^2	0.824	0.811	0.819	0.824

Tabla 28: Modelos matemáticos para la conductividad del agua tratada con el coagulante San Pedro

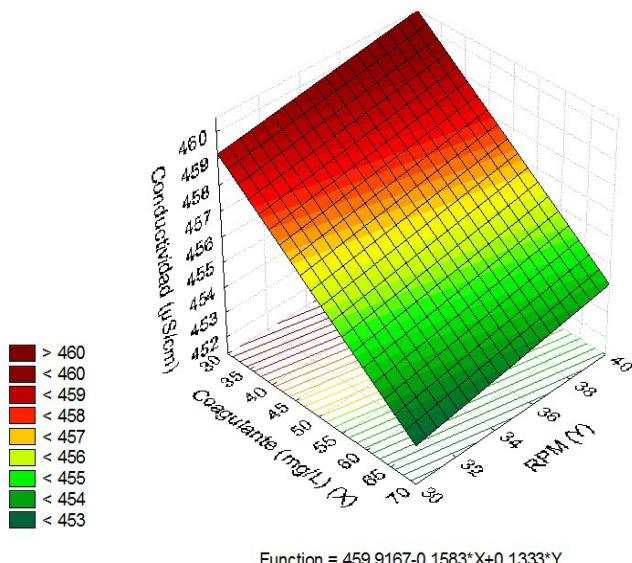


Figura 49. Superficie de respuesta para la conductividad del agua tratada con el coagulante San Pedro

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL FLOCULACIÓN

APLICACIÓN DEL COAGULANTE DE NOPAL

Considerando los modelos que presentaron mejor ajuste para los parámetros en estudio, las cuales se resumen en la Tabla 29, se realizó la optimización correspondiente, tomando en consideración las restricciones para el pH, Turbidez, Dureza y Conductividad de acuerdo al DS N° 031-2010-SA (DIGESA, 2011).

Coeficientes	Actividad Floculante	% de Remoción	pH	Turbiedad	Dureza	Conductividad
Intercepto	15.8886	98.1806	6.3020	0.5864	176.3194	459.9444
Coagulante	1.3353	0.0334	0.0102	-0.0108	-0.1375	-1.7667
Coagulante^2	---	-0.0002	-0.0002	0.0001	---	0.0117
Velocidad	0.6672	0.0060	0.0022	-0.0019	-0.0444	-0.3889
Velocidad ^2	---	---	---	---	---	---
Coagulante* Velocidad	-0.0202	-0.0002	---	0.0001	---	0.0067
R ²	0.865	0.903	0.937	0.903	0.734	0.936

Tabla 29: Resumen de modelos de parámetros para para el tratamiento con coagulante Nopal

El método de resolución de la optimización aplicado en el complemento SOLVER de Excel, fue el GRG Nonlinear, cuyas restricciones o límites superiores e inferiores se muestra en la Tabla 30, para lo cual se consideró como función objetivo el porcentaje de remoción (%R), con las restricciones correspondientes.

Es así que para obtener una remoción optima del 99.29% se requerirá 53.5 mg/L de coagulante liofilizado de Nopal, a una velocidad de agitación de 34.9 RPM, bajo esas condiciones se obtendrá una actividad floculante del 72.97%, pH del agua tratada de 6.5, turbiedad de 0.23 NTU, dureza de 167.41 mg CaCO₃/L y conductividad de 397.69 μ S/cm, se debe tener en cuenta que los valores dependerán de las condiciones iniciales del agua a tratar.

Parámetros		Minimo	Máximo	Óptimo
Función objetivo	%Remoción	---	100	99.29
	AF (%)	---	90	72.97
	pH*	6.5	8.5	6.50
	Turbiedad (NTU)*	0	5	0.23
Restricciones	Dureza (mg CaCO ₃ /L)*	0	500	167.41
	Conductividad (μS/cm)*	0	1500	397.69
	Coagulante (mg/L)	30	70	53.5
	Velocidad de agitación (RPM)	30	40	34.9

Tabla 30: Valores óptimos y restricciones en el tratamiento con coagulante Nopal

*Los LMP fueron tomados del DS N° 031-2010-SA (DIGESA, 2011).

APLICACIÓN DEL COAGULANTE DE SAN PEDRO

Los modelos que presentaron mejor ajuste se presentan en la Tabla 31, y a través de la cuales se realizó la optimización de los parámetros en estudio, tomando en consideración las restricciones para el pH, Turbidez, Dureza y Conductividad de acuerdo al DS N° 031-2010-SA (DIGESA, 2011).

Coeficientes	Actividad Floculante	% de Remoción	pH	Turbiedad	Dureza	Conductividad
Intercepto	2.5109	97.4610	7.4267	0.8183	174.8611	459.9167
Coagulante	0.8526	0.0202	-0.0113	-0.0065	-0.1083	-0.1583
Coagulante^2	0.0077	---	---	---	---	---
Velocidad	1.4479	0.0209	-0.0134	-0.0067	-0.0028	0.1333
Velocidad ^2	---	---	---	---	---	---
Coagulante* Velocidad	-0.0373	-0.0002	0.0002	0.0001	-0.0008	---
R ²	0.793	0.931	0.793	0.931	0.716	0.824

Tabla 31: Resumen de modelos de parámetros para para el tratamiento con coagulante San Pedro

Luego de la optimización a través del utilitario Solver de Excel, se encontró que para obtener un porcentaje de remoción optima de 99.06% se requerirá 70 mg/L de coagulante y una velocidad de agitación de 40 RPM, de ese modo se obtendrá una actividad floculante del 53.15%, pH del agua tratada de 6.70, turbiedad de 0.30 NTU, dureza 151.33 mg CaCO₃/L, conductividad 454.17 μS/cm, no obstante se debe tener en cuenta que los valores encontrados dependerán de las condiciones iniciales del agua a tratar

Parámetros		Mínimo	Máximo	Óptimo
Función objetivo	%Remoción	---	100	99.06
	AF (%)	---	90	53.15
	pH*	6.5	8.5	6.70
	Turbiedad (NTU)*	0	5	0.30
Restricciones	Dureza (mg CaCO ₃ /L)*	0	500	151.33
	Conductividad (μS/cm)*	0	1500	454.17
	Coagulante (mg/L)	30	70	70.0
	Velocidad de agitación (RPM)	30	40	40.0

Tabla 32: Valores óptimos y restricciones en el tratamiento con coagulante San Pedro

*Los LMP fueron tomados del DS N° 031-2010-SA (DIGESA, 2011).

APORTES TEÓRICOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

DEL RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE COAGULANTE

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que la extracción presento bajo rendimiento sobre todo para la variedad San Pedro, esto se debe a que cerca al 20% (Anexo 01) del peso corresponde a la cascara, espinas y la parte central en el caso de la variedad San Pedro, mientras que aproximadamente el 10 % para el Nopal, del mismo modo el bajo rendimiento se debe a alto contenido de humedad de estas plantas, no obstante el rendimiento es mayor en comparación a lo reportado por Villaloba *et al.* (2013) quien reporto un rendimiento del 6.5% al someter el coagulante a secado por aire caliente, en tanto que para la extracción en un medio solvente como el etanol el rendimiento es menor en comparación a lo obtenido por liofilización, es así que Vargas-Rodríguez *et al.* (2016) reportaron un rendimiento del 2,56%, Rodríguez (2017) reporto 1,96%, y Choque (2018) reporto rendimiento < 1%, para el coagulante de Nopal.

DE LA CAPACIDAD CLARIFICANTE

En cuanto a la actividad floculante se observó que el coagulante de la variedad Nopal presento mejor AF, superando significativamente a la variedad San Pedro, por otra parte el incremento de la dosis de coagulante aumenta la AF, y que la velocidad de agitación reporta ligeros efectos sobre AF, es así que se obtuvieron valores de hasta 85.04 ± 4.37 para el Nopal y 66.04 ± 4.447 para San Pedro (Tabla 7), Choque-Quispe *et al.* (2018) encontró una AF de 46.5 y 48.5 para coagulantes de Nopal y San Pedro extraídos con solvente como el etanol y posterior secado, de otra parte Sánchez y Untiveros (2004) encontraron un valor de 36.54% para la actividad floculante de la pectina con concentración de 30 ppm (0.003%) en agua residual artificial formulada con caolín y hierro (III), y 10.53% en agua residual artificial formulada con caolín y cromo (III), aunque en ambos casos existe un descenso de la actividad floculante con el incremento de concentración de pectina, es así que los resultados obtenidos son relativamente mayores a los antecedentes, este hecho se puede deber a que el proceso de liofilización, lo que permite mantener intactas el comportamiento de las cadenas polianiónicas, las cuales presentan propiedades coloidales, y que pueden flocular por acción de iones de carga positiva (Herbstreith y Fox, 2003).

En general los coagulantes extraídos por liofilización presentan alto porcentaje de remoción de sólidos, y de estos la variedad *Nopal* presentó resultados, mayores al 99.03 % tal como se aprecia en la Tabla 7, Choque-Quispe *et al.* (2018) reportó valores similares de remoción cuando utilizó los mismos coagulantes extraídos con etanol seguido de secado

por convección, por otra parte Yagual y Torres (2012) encontraron porcentajes de remoción entre 95.0 % a 99.6 % para muestras de agua de río cuando utilizó coagulantes como Sulfato de Aluminio, Floculante Praestol 650 TR y Floculante Químico Artesanal, Quirós *et al.* (2010) encontraron una remoción de sólidos del 83% cuando utilizó Moringa como coagulante natural a 400 ppm, asimismo encontró un porcentaje de remoción que va de 20% a 100% cuando utilizó quitosano como coagulante, para la tuna *Cactus lefaria* el porcentaje de remoción estuvo entre 94% a 100% para dosis de mínimas de 45 ppm y máximas de 180 ppm en todos los casos agregando CaO, mientras al agregar Sulfato de Aluminio a 12 ppm logró remociones de sólidos hasta del 92% cuando se aplicó 22.5 ppm de coagulante de tuna *Cactus lefaria*.

Por otra parte, se reportaron dosis óptimas de tuna en el rango de 10 a 20 mg/l que remueven entre 80 a 90% de sólidos (Martínez *et al.*, 2003), mientras que Quirós *et al.* (2010) encontraron dosis de 45 mg/l. Sin embargo, este autor únicamente reporta clarificación de turbidez que, por su mayor tamaño de partícula, necesita menores dosis de coagulante, recomienda aplicar la tuna en aguas con turbidez mayor, dado que encontró que la eficiencia de la tuna para remover la turbidez se incrementó conforme la turbidez inicial era mayor, en el presente estudio se logró utilizar concentraciones de los coagulantes naturales que van de 1% a 3% de solución o su equivalente de 50 a 150 ppm de los coagulantes de las cactáceas en estudio. Sciban *et al* (2009) encontraron porcentajes de remoción que van del 70% a 80% para coagulantes naturales procedentes de semillas de castaño y bellota de algunas variedades de *Fagaceae* como el roble común y castaña Europea, asimismo Bratskaya *et al.*, (2004) encontró porcentajes del 68% a 90% de remoción cuando aplicó coagulante natural de mucilago de *Plantago psyllium*. Qudsieh *et al.* (2008) sintetizaron un copolímero coagulante de poliacrilamida combinado con almidón de *Metroxylon sagu*, un material extraído de una palma asiática, el estudio demostró una alta remoción de turbiedad del 97 % en soluciones estándar de caolinita, en tanto que Contreras *et al.* (2015) reportó remoción de hasta el 98% al utilizar extracto de nopal con alumbre con formulación 20% y 80% respectivamente.

Almendárez (2004) comprobó la efectividad de coagulación de un polímero natural extraído de las pencas de *Opuntia cochinellifera* (planta nativa de Centroamérica) en aguas superficiales. Solís *et al.*, (2012) propuso la mezcla de un polímero natural basado en almidón extraído de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) con sulfato de aluminio comercial, comparando la eficiencia de remoción de partículas suspendidas con la eficiencia alcanzada con solamente sulfato de aluminio grado comercial, logrando rendimientos de remoción del 97.9 % a 98.7% para agua superficial de un río.

Según Schulz y Okun (1998), una gran variedad de materiales tanto sintéticos como

naturales están disponibles para ayudar la clarificación del agua. La aplicación correcta de estos coadyuvantes coagulantes puede mejorar las características de sedimentación y la firmeza del floculo, lo que a su vez permite periodos de sedimentación más cortos y tasas de filtración más altas. Sin embargo, lo más importante de los coadyuvantes es que pueden reducir significativamente la dosis requerida del coagulante primario (por ejemplo, sulfato de aluminio), lo cual es un beneficio para los países en desarrollo que deben importar coagulantes.

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA TRATADA

El pH del agua tratada disminuyó considerablemente con respecto al pH del agua potable de 7.87 hasta valores 6.35 (Tabla 9), este hecho se debe a que el pH del coagulante es bastante básico de hasta 5.30 y 4.42 para el coagulante Nopal y San Pedro respectivamente, del mismo el ligero incremento se debe a la cantidad de dosis de este, así como el coagulante aditivo Fe_3SO_4 , estos resultados fueron similares a los encontrados por Choque-Quispe *et al.* (2018) quien reportó valores de pH 6.96 y 7.28 del agua tratada con mucilago extraído con etanol y deshidratado por convección de Nopal y San Pedro respectivamente, por otra parte Villabona *et al.* (2013) reportó valores de pH entre 7.5 a 7.9 al tratar agua con coagulante Nopal secado por aire caliente, del mismo modo Vaca-Mier *et al.* (2014) observó que el pH se incrementa de 7.04 a 7.148 al agregar dosis de 10 a 70 mg/L de coagulante nopal en polvo secado por convección, mientras que Vázquez (1994), muestra una ligera disminución del pH de 7.46 del agua residual inicial a pH 7.43 del agua tratada con variedades de *Opuntia*, Yagual y Torres (2012), muestra una disminución considerable del pH del agua del río de 6.7 hasta 5.2 al aplicar coagulante floculante químico artesanal, por otra parte Solís *et al.*, (2012) evidenciaron que el pH del agua tratada con mezclas de coagulantes de almidón de yuca y Sulfato de Aluminio no varía significativamente presentando tendencias menos acidas hasta 6.7 desde un valor inicial del agua sin tratar de 6.9, Miranda *et al.* (2012) al tratar aguas residuales mineras con una mezcla de coagulantes Cal – Kollpa (alumbre del Altiplano) mostró un incremento del pH de 5.83 a 7.87.

Restrepo (2009), realizó el proceso de coagulación-floculación para agua potable con un pH inicial de 7.37, observó que el pH descendía a niveles ácidos de 6.20 en promedio al tratar con Sulfato de Aluminio, mientras que con el coagulante Policloruro de Aluminio aumentó a pH 7.31 en promedio, en la presente investigación se observó que el pH del agua tratada aumenta en todos los casos hasta un valor máximo de pH 7.58, no obstante la OMS no establece un valor guía pero recomienda su control para una adecuada clarificación y desinfección del agua para lo cual el pH no debe ser mayor de 8, en ese

sentido los resultados reportados en la presente investigación (Tabla 9) se encuentra dentro de los LMP para agua de consumo humano que establece en el rango de 6.5 a 8.5 (DIGESA, 2011), por lo que la adición de los coagulante naturales no afectan el pH del agua tal como lo evidencio (Contreras et al. 2015; Vaca-Mier et al., 2014).

El hecho de la turbiedad del agua se debe a los coloides suspendidos procedentes de los coagulantes naturales, y que en muchos casos es difícil su remoción, no obstante, los resultados de la turbiedad para el agua tratada con ambos coagulantes son bajos (Tabla 11), estando estos dentro de los LMP para el agua de consumo humano que establece valores de turbiedad menores a 5 NTU (DIGESA, 2011), aunque la OMS recomienda valores ideales de hasta 1 NTU.

Del mismo modo el incremento de la cantidad de coagulante permitirá mejores resultados de remoción de turbiedad, debido a que permiten formar flocs estables y alto peso específico, sedimentando rápidamente, aunque sobredosis de coagulantes permiten la formación de microflocs cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto, la turbiedad residual es igualmente elevada (Torres et al., 2009), es así que el incremento de la velocidad de agitación reporta ligera diminución en la turbiedad, aunque es no es significativa (Tabla 12), por lo que se estaría rompiendo los flocs en partículas más pequeñas.

Beltrán y Sánchez (2009) reportaron remoción de turbiedad del agua residual hasta un 70% al usar usaron extracto de Moringa oleífera por su alta capacidad floculante, los cuales con altamente recomendado, especialmente en países en desarrollo, , donde es difícil encontrar productos fáciles de manejar, del mismo modo estos autores usaron sulfato de sodio y Moringa oleífera removiendo hasta el 80%, por otra parte también usaron coagulantes naturales como almidón, mucílago de nopal y goma tara, combinados con polímeros sintéticos, cuyos resultados son prometedores.

Mientras que Apaza (2013), reporto valores de remoción de turbiedad de hasta 80% al tratar agua residual con extracto de nopal, mientras que al combinar con sulfato de aluminio se reportó remoción de 68 a 0.10 NTU, en tanto que Vaca-Mier et al., (2014) al tratar agua residual con polvo de nopal en dosis de 10 y 70 mg/L y tiempo de agitación de 3 min a 150 rpm con tiempo de reposo de 30 min redujeron entre 65 hasta 92%.

Morejón (2017), al tratar agua para consumo humano no variación considerable de la dureza del agua al tratar con extracto de Nopal, en tanto que Choque--Quispe et al. (2018) encontró que el incremento de la dosis de coagulante de Nopal y coagulante San Pedro extraídos con etanol y posteriormente secado en convección forzada y pulverizada, no mostraron disminución significativa en comparación al agua sin tratamiento, no obstante Vázquez (1994), reporta que la dureza del agua artificial tratada con una mezcla

de coagulantes de Sulfato de Aluminio y *Opuntia L.* disminuye ligeramente la dureza de 200 ppm de CaCO_3 a 196 ppm de CaCO_3 , Miranda *et al.* (2012), muestra un incremento de 692.0 a 942.0 ppm de CaCO_3 al tratar aguas residuales mineras con una mezcla de coagulantes de Cal y Kollpa (Alumbre del Altiplano), mientras que el mismo autor para el coagulante Sulfato ferroso y Cal disminuye la dureza de 1122.0 a 293.0 ppm de CaCO_3 ; en general la gente tolera hasta 300 ppm de dureza, que sea el valor guía establecido por la OMS con fines estéticos, mientras que la DIGESA (2011) estable como valor máximo 500.0 mg CaCO_3/L para agua de consumo humano, no obstante no se ha definido si la dureza tiene efectos adversos sobre la salud (Soto, 2010).

La conductividad es propiedad que depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y la temperatura de medición. La variación de la conductividad proporciona información acerca de la productividad primaria y descomposición de la materia orgánica (Samboni *et al.*, 2002), y esta se incrementa principalmente con el contenido de iones (Ramírez *et al.*, 1998), en el presente estudio realizado se observó que la conductividad disminuyó considerablemente (Tabla 15), este hecho se debe a que los coagulantes naturales tienen actividad quelante, es decir permiten atrapar iones y metales (Vicentius, 2008), este mismo hecho reportó Apaza (2013) observando una disminución de hasta el 50% de la conductividad al tratar agua residual con extracto de mucilago de nopal, mientras que Contreras *et al* (2015) reportó disminución ligera de la conductividad de agua al tratar con nopal cristalizado, por otra parte Choque (2018), observó que la conductividad no varió significativamente al tratar agua con coagulante de Nopal y San Pedro cristalizado.

Es así que la conductividad obtenida para el agua tratada con los dos coagulantes naturales, se encuentran dentro de los LMP para aguas de consumo humano, que estable como máximo 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (DIGESA, 2011)

DE LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FLOCULACIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en la optimización se observó que se logró un porcentaje de remoción mayor al 99% para ambos coagulantes naturales, en tanto que al someter el agua artificial únicamente a 20 ppm y 4 ppm de cal, se obtuvo un porcentaje de remoción de 97%, en ese sentido se logró mejorar ligeramente los resultados, no obstante para la prueba con los coagulantes naturales se empleó dosis de 10 ppm de sulfato férrico, lo que reduce su uso, por lo que la producción de lodos es mínima además de poder tener un reusó como a través del compostaje, ya que al tratar únicamente con sustancias químicas, se producen lodos que son difíciles de tratar; además de que estos lodos remanentes generan tierras inertes no aptas para la agricultura (Rios *et al.*, 2006).

Por otra parte, el agua obtenida luego del tratamiento se encontró dentro de los LMP

para agua de consumo humano establecidos en el DS N° 031-2010-SA (DIGESA, 2011), por lo que el uso de estos coagulante son prometedores tal como lo reportaron Choque *et al.* (2018), Contreras *et al.* (2015), Vaca-Mier *et al.* (2014), y Villabona *et al.* (2013),

CONCLUSIONES

El rendimiento de extracción del coagulante liofilizado fue de $3.29 \pm 0.25\%$ para la variedad San Pedro, mientras que la variedad Nopal fue $7.13 \pm 0.32\%$, el cual fue superior a lo reportado por otros autores.

La capacidad clarificante fue evaluada a través de la actividad floculante el oscilo entre 55.82 a 85.04% para el coagulante Nopal y para la variedad San Pedro osciló entre 46.08 a 66.04%, la cual estuvo influenciado directamente por la dosis de coagulante y velocidad de agitación ($p\text{-value} < 0.05$), mientras que el porcentaje de remoción oscilo entre entre 99.03 a 99.35 % para el coagulante Nopal y para la variedad San Pedro entre 98.50 a 99.03 %, estando influenciado directamente por la dosis de coagulante ($p\text{-value} < 0.05$).

Dentro de los parámetros fisicoquímicos se observó que el pH disminuye ligeramente en comparación al pH del agua inicial de 7.87, siendo que para el coagulante de la variedad Nopal oscilo entre 6.35 a 6.55, y para el coagulante San Pedro entre 6.69 a 6.90, mostrando efecto significativo positivo la adición de coagulante y la velocidad de agitación ($p\text{-value} < 0.05$), en cuanto a la turbiedad esta no mostro diferencia significativa con el agua sin tratar ($p\text{-value} > 0.05$) encontrándose en el intervalo de 0.21 a 0.48 NTU en ambas variedades de coagulante, por otra parte la dureza disminuyo considerablemente de su valor inicial 231 mg/L hasta intervalos de 165 a 171 mg/L para el coagulante Nopal y de 187.67 a 193.67 mg/L para el coagulante San Pedro, del mismo modo se observó que la adición de coagulante mostro efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$), asimismo la conductividad disminuyo desde 523 $\mu\text{S}/\text{cm}$ del agua sin tratar hasta intervalos de 396 a 412 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el coagulante Nopal y de 453 a 460 para el coagulante San Pedro estando influenciado directamente por la dosis de coagulante.

Los valores óptimos de coagulante fueron 53.5 mg/L y 34.9 RPM al tratar con el coagulante Nopal, reportándose un porcentaje de remoción de 99.29%, pH 6.5, turbiedad 0.23 NTU, dureza 167.4 mg/L y conductividad 397.69 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que para el coagulante San Pedro la dosis optima fue 70 mg/L de coagulante y 40 RPM con el cual se consiguió un pH de 6.70, turbiedad de 0.30, dureza 152 mg/L y conductividad de 454.17 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en todos los casos estos parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de los LMP establecidos en el DS N° 031-2010-SA (DIGESA, 2011).

REFERENCIAS

- Almendárez, N. (2004). Comprobación de la efectividad del coagulante (cochifloc) en aguas del lago de Managua “Piedras Azules”. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 5(1): 46-54.
- Andía, Y. (2000). *Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de Agua: Coagulación Floculación*. SEDAPAL. Lima, Perú.
- Apaza, H. (2013). Tratamiento ecológico, una alternativa sustentable para la purificación de aguas contaminadas destinadas al riego de cultivos en Arequipa. Tesis de posgrado, Universidad Católica Santa María, Arequipa, Perú.
- APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20. ed. Washington: APHA, 1998.
- Arboleda, (2000) *Teoría y práctica de la purificación del agua*. 3era edición. Editorial McGraw Hill.
- Beltrán, J., Sánchez, J. (2009) Improvement of water treatment pilot plant with Moringa oleifera extract as flocculant agent. *Environmental Technology* 30(6):525-534.
- Bolaños, V.; Fernández, A. (2002). *Economía y Política Medioambiental*. Ed. Pirámide, 2002.
- Bratskaya, S.; Schwarz, S.; Chervonetsky, D. (2004). Comparative study of humic acids flocculationn with chitosan hydrochloride and chitosan glutamate, *Water Research*, 38, 2955 – 2961.
- CEPIS/OPS/OMS (1991). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Lima Peru.
- Chávez, J.E., Cunaique, I.J., Pinco, J.E. (2019). Proceso de obtención y evaluación de la eficiencia del almidón del plátano de seda (*Musa acuminata* AAA) para la coagulación – floculación de las aguas superficiales del río Puchca – Ancash, Perú, a nivel de laboratorio. Tesis de pregrado, Universidad del Callao, Lima, Perú. 125p.
- Choque, Y. (2018). Evaluación y optimización de la capacidad floculante de 03 variedades de cactáceas en el tratamiento de aguas residuales. Tesis de maestría, UNSAAC, Cusco, Perú. p120.
- Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A.M., & Ramos-Pacheco, Betsy S. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnología Química*, 38(2), 298-309.
- Contreras, K., Aguas, Y., Verbel, R., Ortega, G., Salcedo, J. (2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Revista producción más Limpia*, 10(1):40-50. DOI: 10.22507/pml.v10n1a3
- DIGESA (2011). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, DS N° 031-2010-SA.
- García, S. A. (2005). Estudio de la eficiencia de eliminación de radionúclidos naturales en procesos compatibles con el de potabilización de aguas. Cáceres, España: Universidad de Extremadura.

González, M.; Hernández, C.; Kaehler, J. (1991). Determinación de aluminio en el agua potable de Valencia y localidades cercanas. Departamento de Química, Universidad de Carabobo.

Guerrero, L.; Ortega, J.M.; Sanz, J. (2003). Tratamientos de regeneración de aguas residuales Depuradas para la recarga de acuíferos. Filtración granular y sistemas integrados de membranas". Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos.

Gutiérrez, H.; de la Vara, R. (2004). Análisis y Diseño de Experimentos. Edit. McGrawHill. México.

Hanson, T.; Jhon, L. (2000). *The effects of temperature on turbulent flocculation: Fluid dynamics and chemistry*. Jour AWWA.

Inchausti, I.; Sasia, P.; Katime, I. (2000). *Floculantes poliméricos no iónicos obtenidos en emulsión inversa:Síntesis y caracterización*. Accesado junio 2014, en <http://www.ehu.es/revibopol/pdf/publicados/inchausti.pdf>.

Jiménez, J.; Vargas, M.; Quirós, N. (2010). *Desarrollo de coagulantes y floculantes para la remoción del color en aguas de consumo humano; el Río Humo, Reserva Forestal Río Macho*. Informe Final de Proyecto de Investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Martínez, D., Chávez, M., Díaz, A., Chacín, E., Fernández N. (2003). *Eficiencia del cactus lefaria para su uso como coagulante en la clarificación de aguas*. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, 26(1):27-33.

Mendez, F.; Feliciano, O. (2010). *Propuesta de un modelo socio económico de decisión de Uso de aguas residuales tratadas en sustitución de agua Limpia para areas verdes*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Ingeniería – UNI, Perú.

Miranda, R., Ttito, S., Palacios, R., Alvarez, A. (2012). Tratamiento de aguas residuales minero metalúrgico por floculación y sedimentación con uso de floculantes naturales mejorados. Facultad de Ingeniería Química Universidad Nacional del Altiplano-Puno, Perú.

Morejón, B.J. (2017). Utilización del mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica*) en el mejoramiento de la calidad del agua de consumo humano, en la comunidad de Pusir grande, provincia del Carchi. Tesis de maestría, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. p146.

Okuda, T.; Baes, A.; Nishijima, W.; Okada, M. (2001). Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. Wat Res 35 (3):830-834.

Orrego A. C. E. (2008). Congelación y Liofilización de Alimentos. Manizales, Caldas, Colombia

Ostolaza, C. (2010). 101 Cactus del Perú. Ministerio del Ambiente – MINAM – Perú.

Picado, L (1984). Aplicación de polímeros naturales al tratamiento de potabilización del agua. Informe del Proyecto Final de Graduación, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Qudsieh, I.Y.; Fakhru, L.; Razi, A.; Kabbashi, N.A.; Mirghani, M.E.S.; Fandi, K.G.; Alam, M.Z.; Muyibi, S.A.; Nasef, M.M.; (2008). Preparation and characterization of a new coagulant based on the sago starch biopolymer and its application in water turbidity removal. J. Appl. Polymer Sci. 109:3140-3147.

Ramírez, A., Restrepo, R., Viña, G. (1998). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales, Formulación y Aplicación. Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(3):135-153.

- Ramírez, J.S. (2006). Liofilización de Alimentos. Reciteia, 6ta edic. Cali, Colombia.
- Restrepo, H.A. (2009). Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. p109.
- Rios, N., Navarro, R., Ávila, M., Mendizábal (2006). Obtención de sulfato de quitosano y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de suspensiones coloidales aniónicas de caolinita. Revista Iberoamericana de Polímeros, 7(3):145-161.
- Rodríguez, A.; Letón, P.; Rosal, R.; Dorado, M.; Villar, S.; Sanz J. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de vigilancia tecnológica. Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME). España.
- Rodríguez, C. (2005). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Santafé de Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Rodríguez, Y.C. (2017). Evaluación del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) como agente estabilizante en néctar de maracuyá (*Passiflora edulis*). Tesis de pregrado, Universidad de la Salle, Bogotá Colombia. p84.
- Roos, R.H. (1987). Effect of moisture on thermal behavior of strawberries studied using differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science*, 52:146-149.
- Salas, J. (1998). *Distribución geográfica y ecológica de las especies amenazadas de extinción del estado de San Luis Potosí*, México. Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, U.A.S.L.P. San Luis Potosí, S.L.P. 1998
- Samboni, N., Carvajal, Y., Escobar, L. (2007). Parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua, estado del arte. *Ingeniería e Investigación*, 27(3):172-181.
- Sánchez, S., Untiveros, G. (2004). Determinación de la actividad floculante de la pectina en soluciones de hierro (III) y cromo (III). *Rev. Soc. Quím. Perú*, 70(4):201-208.
- Sceni, P. (2007). Transiciones de Fase. Universidad Nacional de Quilmes. Area de Química de los Alimentos.
- Schulz, R.C., Okum, A. (1991). Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Ed. LIMUSA S.A. México
- Sciban, M.; Klasnja, M.; Antov, M.; Skrbic, B. (2009). Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn, *Bioresource Technology*, 100: 6639 – 6643.
- SIQYPN. (1992). XIX Simposium Internacional de Química y Productos Naturales. Monterrey N.L. México.
- Solís, R., Laines, J.R., Hernández, J.R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28(3):229-236.
- Soto, J. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 11(2):167 - 177.

Tarifa, E. (2000). Optimización y Simulación de Procesos - Métodos Numéricos - Universidad Nacional de Jujuy. Argentina

Torres, L.G., Belloc, C., Vaca, M. Iturbe, R., Bandala, E.R. (2009) Coagulation flocculation process applied to wastewaters generated in hydrocarbon contaminated soil washing: Interactions among coagulant and flocculant concentrations and pH value. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.*, 44(13):1449-56. DOI: 10.1080/10934520903217716

Vaca-Mier, M., López-Callejas, R., Flores-Rodríguez, J., Terres, H., Lizardi, A., Ramos, A. Rojas – Valencia, A. (2014). Aplicación del nopal (*Opuntia ficus indica*) como coagulante primario de aguas residuales. *revista AIDIS*, 7(3):210-216.

Vargas-Rodríguez, L., Arroyo, G., Herrera, C.H., Pérez, A., García, M.I., Rodríguez, J. R. (2016). Propiedades físicas del mucílago de nopal. *Acta Universitaria*, 26(NE-1):8-11. DOI: 10.15174/au.2016.839

Vicentius, O.A. (2008). Review, Recent Progress on Biosorption of Heavy Metals from Liquids Using Low Cost Biosorbents: Characterization, Biosorption parameters and Mechanism Studies. *CLEAN – Soil, Air, Water.* 36: 937-962.

Villabona, A., Paz, I.C. Martínez, J. (2013). Characterization of *Opuntia ficus-indica* for using as a natural coagulant. *Rev. Colomb. Bioteclol.*, 15(1):137-144.

Yagual, M.G., Torres, F. (2012). Análisis comparativo del proceso de flocculación-coagulación en la potabilización de agua de río, usando como fuente de captación el Río Daule y el Río Babahoyo en la Provincia del Guayas. Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales, ESPOL. Guayaquil, Ecuador.

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Agua de consumo humano

Se denomina agua potable o agua apta para el consumo de los humanos al agua que puede ser consumida sin restricción para beber, preparar alimentos, higiene personal y usos domésticos que se suministran a través de las redes de distribución pública o privada.

Cataceas

Las cactáceas son una familia de plantas suculentas y en gran mayoría, espinosas, conocidas en conjunto como **cactos** o **cactus**. Esta familia es originaria de América.

Capacidad clarificante

Es la capacidad que ofrecen las sustancias químicas o naturales que permiten clarificar aguas con diferentes niveles de turbiedad.

Coagulación

La coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancia químicas que son los coagulantes, permitiendo forma un precipitado (Rodríguez, 2005).

Coagulantes

Son sustancias de carácter orgánico e inorgánico que forman coloides, que se utilizan en el proceso de coagulación.

Conductividad

La conductividad en el agua, es la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido. Las unidades son Siemens por metro [S/m] en sistema de medición SI y micromhos por centímetro [mmho/cm] en unidades estándar de EE.UU.

Dureza total

Es la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. El agua denominada comúnmente como “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en muy poca cantidad.

Floculación

La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico – floculos (Rodríguez, 2005).

pH

El pH es una medida indirecta del grado de acidez o alcalinidad de una disolución, del mismo modo indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones

Sedimentación

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador.

Turbidez

Es la medida del grado de transparencia que pierde el agua por la presencia de partículas en suspensión. Cuanto mayor sea la cantidad de sólidos suspendidos en el líquido, mayor será el grado de turbidez.

Velocidad de agitación

Es la velocidad angular medida en rpm, que permiten la mezcla de aditivos y sólidos suspendidos en el agua, para la formación de flocs durante el proceso de coagulación y floculación en el tratamiento de aguas

Liofilización

La liofilización, que se basa en el desecado de determinados materiales por medio de la sublimación del agua contenida en éstos. Se realiza congelando el producto y se remueve el hielo aplicando calor en condiciones de vacío, de esta forma el hielo sublima evitando el paso por la fase líquida (Ramírez, 2006).

PANEL FOTOGRAFICO



Preparación del Nopal



Picado del Nopal



Cactáceas picadas – San Pedro



Liofilizado de cactaceas



Tamizaje del coagulante



Coagulantes en polvo



Prueba de jarras



Determinación de dureza



Determinación de dureza



Medición de pH y conductividad

YUDITH CHOQUE-QUISPE, Docente Investigador RENACYT, Ingeniero Agrónomo (UNAAC, Perú), Ingeniero Ambiental (UAP, Perú), Magister en Ingeniería Civil – Recursos Hídricos y Medio Ambiente (UNAAC, Perú), Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (UAC, Perú), Profesor en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental (UNAJMA, Perú), Miembro del Grupo de Investigación en desarrollo de materiales avanzados para el tratamiento de aguas y alimentos - (G-LIMTA). <https://orcid.org/0000-0002-3690-7267>

DAVID CHOQUE-QUISPE, Docente investigador RENACYT, Ingeniero Químico (UNAAC, Perú), Maestro en Ciencias (UNAAC, Perú), Ingeniero Ambiental (UAP) y Dr. en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (UAC, Perú), Doctorante en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambiental (UFPR, Brasil); actualmente es docente Asociado Ordinario en la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial (UNAJMA), Responsable del Laboratorio de Investigación en Control y Análisis de Aguas, miembro del Grupo de Investigación en Nutraceuticos y Biopolímeros (GINBIO), Coordinador del Grupo de Investigación en desarrollo de materiales avanzados para el tratamiento de aguas y alimentos - (G-LIMTA). <https://orcid.org/0000-0003-4002-7526>

AYDEÉ M. SOLANO-REYNOSO, Investigadora RENACYT, Profesora de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental (UTEA, Perú), Bióloga-Microbióloga (UNSCH, Perú), Magister en Educación Superior (UAP, Perú), Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (UAC, Perú), Miembro del Grupo de Investigación en desarrollo de materiales avanzados para el tratamiento de aguas y alimentos - (G-LIMTA). <https://orcid.org/0000-0002-1835-2210>

MERY LUZ MASCO-ARRIOLA, Profesora principal de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNAAC, Perú). Ingeniero Químico (UNAAC, Perú), Maestría en Ciencia de los Alimentos (University of Illinois at Urbana Champaign, USA), Doctor en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (UNA, Perú). Actualmente es decano de la Facultad de Ingeniería de Procesos – UNSAAC. <https://orcid.org/0000-0002-5156-6464>

LILIANA A. SUMARRIVA-BUSTINZA, Químico Farmacéutico (UNMSM-Perú), Magister Scientiae- Nutrición (UNALM-Perú), Doctor en Ciencias de la Educación (UNE E. Guzmán y Valle-Perú), Mención Honrosa “Hipólito Unanue” en el área de Farmacia y Bioquímica, Entrenamiento e Investigación de Cultivo de Algas y Producción de Polisacáridos (National Food Reserch Institute en.Tsukuba – Japón), pasantía en Valores Humanos en Agua, Sanitización y Educación para la Higiene. (Tailandia); en la actualidad docente principal ordinario del Departamento de QUIMICA, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle. <https://orcid.org/0000-0002-6128-3089>

JOHN PETER AGUIRRE-LANDA, Investigador RENACYT, Licenciado en Administración, Magíster en Gestión Pública y Doctor en Administración. Ha sido Jefe de Recursos Humanos, Director de Administración, Director de Planificación y Presupuesto. En el sector privado ha ocupado cargos como jefe de la Oficina de Planeamiento, Gerente de Riegos y Gerente General. Actualmente es docente asociado de la UNAJMA donde ha ocupado

cargos como director del Departamento Académico, Director de la Escuela Profesional de Administración de Empresas, Director de la Oficina Central de Admisión, Secretario Académico de Facultad de Ciencias de la Empresa, Director del Centro Pre Universitario, y Director de la Oficina de Responsabilidad Social Universitaria. <https://orcid.org/0000-0002-6604-9371>

HENRRY WILFREDO AGREDA CERNA, Licenciado en Administración (UNT, Perú), Maestro en Administración de la Educación (UCV, Perú), Bachiller en Contabilidad (UIGV, Perú) y Doctorante en Administración (UNAAC, Perú); actualmente docente Ordinario Asociado adscrito al Departamento Académico de Ciencias Empresariales en la Universidad Nacional José María Arguedas (DACE-UNAJMA, Perú), Presidente del Comité Editorial de la UNAJMA. <https://orcid.org/0000-0003-0253-1588>

KATIA CHOQUE QUISPE, Maestría en Administración mención Gestión Pública y Desarrollo Empresarial (UNAAC, Perú) con experiencia en finanzas, tributación y administración en empresas del sector servicio y producción. Indicadores claros de liderazgo, proactividad y orientación a resultados. <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0003-0789-293X>

JULIO CÉSAR LOAYZA-CÉSPEDES, Ingeniero Agrónomo (UNJBG, Perú), Magister en Docencia Universitaria e Investigación Pedagógica (USP, Perú), Doctor en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (UNA, PERÚ), Profesor la Escuela de Ingeniería Agropecuaria - Ciencias Agrarias (UNAAC, Perú). <https://orcid.org/0000-0003-3160-7799>

ANTONIETA MOJO-QUISANI, Investigadora RENACYT, Profesor Auxiliar de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNAAC, Perú). Ingeniero Agroindustrial (UNAAC, Perú). Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos (UNAAC, Perú). Actualmente es docente de la Facultad de Ingeniería de procesos - UNAAC. <https://orcid.org/0000-0002-4370-4409>

COAGULANTES NATURALES EXTRAÍDOS POR LIOFILIZACIÓN APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS



www.atenaeditora.com.br 
contato@atenaeditora.com.br 
[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 
www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

COAGULANTES NATURALES EXTRAÍDOS POR LIOFILIZACIÓN APLICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS



www.atenaeditora.com.br 
contato@atenaeditora.com.br 
[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 
www.facebook.com/atenaeditora.com.br 