

INFLUENCIA DEL TIPO DE FLOCULANTE EN EL ESPESOR DE LA TORTA EN
FILTROS DE VACÍO EN UN INGENIO AZUCARERO

JORGE HUMBERTO MORALES LOPEZ
LUESDY YURANY RODRIGUEZ CRIOLLO

CORPORACION UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS, UNIMINUTO.
INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
BUGA (VALLE DEL CAUCA)
2024

INFLUENCIA DEL TIPO DE FLOCULANTE EN EL ESPESOR DE LA TORTA EN
FILTROS DE VACÍO EN UN INGENIO AZUCARERO

JORGE HUMBERTO MORALES LOPEZ
LUESDY YURANY RODRIGUEZ CRIOLLO

Trabajo de grado para optar por el título de:
INGENIERO(A) AGROINDUSTRIAL

Directora de tesis:
NATALIA SOFIA VARGAS MARIN
MAGISTER EN INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

CORPORACION UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS, UNIMINUTO.
INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
BUGA (VALLE DEL CAUCA)
2024

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Buga (Valle del Cauca), 26 de octubre de 2024

Dedico esta tesis a Dios, por su guía y fortaleza en cada paso de este camino. A mi familia, cuyo amor y apoyo incondicional me han impulsado a seguir adelante. A mi director de tesis, por su invaluable orientación y confianza en mis capacidades.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por ser la guía y la fortaleza en cada paso de este camino. Su luz ha iluminado mis momentos de duda y me ha dado la determinación para seguir adelante.

A mi familia, gracias por su amor incondicional y apoyo constante. Ustedes han sido mi pilar fundamental, brindándome el ánimo y la motivación necesarios para alcanzar mis metas. Sin su comprensión y sacrificio, este logro no habría sido posible.

A mi directora de tesis, Natalia Sofía Vargas Marín, agradezco profundamente su orientación, paciencia y dedicación. Su experiencia y conocimientos han sido invaluable en el desarrollo de este trabajo, y cada consejo que me brindó ha dejado una huella significativa en mi formación profesional.

Finalmente, quiero extender mi gratitud al grupo de ingeniería del ingenio azucarero, por la oportunidad de aprender y crecer en un entorno tan enriquecedor. Su apoyo y colaboración han sido esenciales para el desarrollo de esta investigación.

A todos ustedes, gracias por formar parte de este importante capítulo de mi vida.

Jorge Humberto Morales López

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero rendir un profundo agradecimiento a Dios, cuya luz y guía han sido mi refugio en este camino. Su amor y fortaleza me han acompañado en cada paso, recordándome que los sueños se alcanzan con fe y perseverancia.

A mis padres, con todo mi amor y gratitud. Gracias por ser mi mayor inspiración y por su sacrificio incondicional. Ustedes han sembrado en mí el valor y la determinación, enseñándome que, a pesar de las dificultades, siempre hay un camino hacia adelante. Su apoyo y confianza en mí han sido el motor que me impulsó a seguir adelante.

A mi querido esposo, gracias por ser mi compañero en esta aventura. Tu paciencia, comprensión y amor inquebrantable me han dado la fuerza necesaria para superar los desafíos. Eres mi refugio y mi motivación, y este logro es también un reflejo de nuestro esfuerzo conjunto.

A Zeus, mi fiel amigo peludo, gracias por brindarme alegría y momentos de tranquilidad en las largas noches de estudio. Tu lealtad y cariño han iluminado mis días y me han recordado la importancia de encontrar felicidad en las pequeñas cosas.

Por último, a mi directora de tesis, mi más sincero agradecimiento. Su apoyo constante, guía experta y dedicación han sido fundamentales en este proceso. Me siento verdaderamente afortunada de haber contado con su orientación y sabiduría.

A todos ustedes, les dedico este trabajo con todo mi corazón. Gracias por ser parte de este viaje tan significativo en mi vida.

Luesdy Yurany Rodríguez Criollo

CONTENIDO

Indice de anexos	11
Introducción.....	12
Justificación.....	14
1. Problema de investigación	15
2. Objetivos.....	18
3.1 Objetivo general	18
3.2 Objetivos específicos	18
3. Marco teórico	19
4.1 Caña de azúcar	19
4.1.1 Aspectos Generales	19
4.2 Azúcar	25
4.2.1 Proceso Tecnológico de la Obtención de Azúcar	25
4. Marco referencial.....	36
5.1 Analisis bibliometrico.....	36
5. Estado del arte.....	40
6. Capítulo I	44
7.1 Metodología.....	44
7.2 resultados y discusión	57
7.3 conclusiones.....	62
7. Capitulo II.....	63
8.1 Metodologia.....	63
8.1 resultados y discusion.....	65
8.2 conclusiones.....	69
8. Capítulo III	70

9.1 Metodología.....	70
9.2 Resultados y Discusión.....	74
9.3 conclusiones.....	86
9. Bibliografía.....	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de carbohidratos en el jugo de caña	22
Tabla 2. Composición de minerales en el jugo diluido.....	23
Tabla 3. Ácidos orgánicos no nitrogenados presentes en el jugo diluido.....	24
Tabla 4. Comparación de la composición y características de los lodos	57
Tabla 5. Valores promedio de los flujos de operación de clarificación del jugo en el periodo enero – junio de 2024.	60
Tabla 6. Frecuencias variables de mayor influencia según literatura.....	64
Tabla 7. Análisis de varianza para tasa de filtración.....	74
Tabla 8. Análisis de Varianza para Resistencia torta.	77
Tabla 9. Análisis de Varianza para Espesor torta	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura filtro rotatorio de vacío.....	32
Figura 2. Estructura filtro banda.....	33
Figura 3. Gráfica documentos por país	36
Figura 4. Documentos por año	37
Figura 5. Documentos por área	39
Figura 6. Análisis de laboratorio a la salida de lodos del clarificador periodo de enero a junio de 2024.	46
Figura 7. Análisis de laboratorio polimetría individual y puntual de la cachaza de los filtros rotatorios durante el periodo de enero a junio de 2024.....	47
Figura 8 Comportamiento reológico.....	58
Figura 9. Balance de masa proceso de clarificación jugo de caña.	59
Figura 10. Preparación de lodos para filtración	61
Figura 11. Efecto de la viscosidad sobre la resistencia de la torta.	65
Figura 12. Efecto de la concentración de floculante sobre la resistencia de la torta (Flopam AN934).....	66
Figura 13. Efecto de la concentración de floculante sobre la resistencia de la torta (Lipeza 1622)	68
Figura 14. Superficie de respuesta tasa de filtración.	76
Figura 15. Superficie de respuesta para resistencia de la torta.	79
Figura 16. Superficie de respuesta espesor de la torta.....	84

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	92
ANEXO 2	97

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera constituye un componente cardinal en la matriz económica alimentaria global, sustentada en una extensa trayectoria histórica que conjuga desarrollos agrícolas y tecnológicos. La transformación de sacarosa en cristales de azúcar representa un paradigma de la evolución técnico-industrial y la innovación metodológica. Este proceso de transformación, que exhibe una aparente simplicidad superficial, comprende una serie de operaciones unitarias de notable complejidad técnica, cada una determinante en las características fisicoquímicas del producto terminal.

El proceso de beneficio industrial de la sacarosa contempla una secuencia de transformaciones físicas y químicas rigurosamente controladas. Las operaciones fundamentales reducción dimensional, clarificación física-química, concentración por evaporación, cristalización fraccionada y separación centrífuga, constituyen los elementos medulares de esta cadena de transformación. Cada fase operativa está optimizada para maximizar la extracción y purificación de sacarosa, mediante la eliminación sistemática de componentes no deseados y la optimización de parámetros de rendimiento.

No obstante, la complejidad inherente a los procesos industriales genera desafíos técnicos que requieren soluciones fundamentadas en principios científicos e innovación tecnológica. Un punto crítico identificado reside en la etapa de clarificación, específicamente en la dinámica de sedimentación y comportamiento reológico de los lodos residuales, fenómeno que impacta significativamente en la eficiencia de los procesos de filtración subsecuentes y, consecuentemente, en los parámetros cualitativos del producto.

La presente investigación aborda un análisis sistemático de los procesos tecnológicos involucrados, con énfasis particular en la problemática de clarificación previamente identificada. Se examinarán los aspectos fundamentales del proceso de manufactura de sacarosa, se caracterizarán los parámetros críticos en la etapa de clarificación y se evaluarán las metodologías propuestas para la optimización de

este proceso. Este estudio no solo pretende profundizar en la comprensión de los mecanismos subyacentes a la producción de sacarosa, sino también identificar oportunidades de mejora y optimización en esta industria centenaria que continúa su evolución en el contexto tecnológico contemporáneo.

Justificación

La presente investigación sobre la influencia del floculante en la formación y espesor de la torta en filtros rotatorios de vacío se justifica por su significativa relevancia en el contexto socioeconómico del sector azucarero colombiano, considerado un pilar fundamental en el desarrollo agroindustrial del país.

El estudio se centra en la etapa crítica de clarificación, donde se ha identificado una problemática recurrente en la mezcla de lodos que afecta considerablemente la eficiencia de la filtración y compromete el funcionamiento de los filtros rotatorios de vacío. Esta situación impacta de manera sustancial en los parámetros de calidad del producto final, la recuperación de sacarosa y la reducción de los costos operativos del proceso.

La investigación propuesta busca profundizar en la comprensión de la interacción entre los agentes floculantes y los sistemas de filtración por vacío, componentes esenciales en el proceso de clarificación, mediante el análisis sistemático de variables operativas, así como la evaluación de la efectividad de diversos tipos y dosificaciones de floculantes. Los resultados derivados de este estudio no solo constituirán un aporte significativo al conocimiento técnico-científico del proceso, si no también contribuye así al fortalecimiento de la competitividad del sector a nivel nacional e internacional.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El sector azucarero en Colombia tiene una gran importancia económica y social. Colombia es uno de los principales productores de caña de azúcar en Latinoamérica, con una industria azucarera que contribuye significativamente al empleo, 265,000 empleos totales, de los cuales 88,000 son directos y 177,000 indirectos, con una contribución al PIB agrícola del 3.7% y un valor agregado que supera los \$2.4 billones de pesos anuales, la producción agrícola y las exportaciones del país. La caña de azúcar es un cultivo estratégico para la economía colombiana, y su procesamiento en ingenios azucareros es una actividad clave en varias regiones del país.(Asocaña, 2023)

El proceso tecnológico del azúcar es un conjunto complejo de etapas que transforman la caña de azúcar en cristales de azúcar. Este proceso comienza con la cosecha y transporte de la caña a los ingenios, donde se inicia la molienda para extraer el jugo. Luego, el jugo pasa por un proceso de calentamiento y alcalinización antes de entrar en la etapa crucial de clarificación. En esta fase, se separan las impurezas del jugo de caña, preparándolo para las etapas subsiguientes. Después de la clarificación, el jugo se somete a evaporación para concentrarlo, seguido por la cristalización, donde se forman los cristales de azúcar. Finalmente, estos cristales se separan de la melaza mediante centrifugación y se secan antes de ser empacados. (Rein 2012)

La etapa de clarificación emerge como un punto crítico que influye significativamente en la calidad del producto final. Esta fase, diseñada para eliminar impurezas del jugo de caña, prepara el camino para las subsiguientes etapas de evaporación y cristalización. Sin embargo, un problema recurrente se ha identificado en la mezcla de lodos después de la clarificación, afectando negativamente la eficiencia de la filtración y, por ende, comprometiendo el funcionamiento de los filtros rotatorios de vacío.

La clarificación es un proceso multifacético que involucra el calentamiento del jugo de caña, la adición de agentes clarificantes como la cal, la formación de flóculos que atrapan impurezas, la sedimentación de estos flóculos y, finalmente, la filtración del jugo clarificado. En este intrincado proceso, dos elementos cobran particular relevancia: el floculante y los filtros de vacío, cada uno desempeñando un papel crucial en la optimización de la clarificación. (Rein 2012)

El floculante, un compuesto químico añadido al jugo de caña, promueve la aglomeración de partículas suspendidas en flóculos más grandes. Su importancia radica en facilitar la separación de impurezas, mejorar la velocidad de sedimentación de los lodos, aumentar la eficiencia de la filtración posterior y contribuir a la claridad y pureza del jugo resultante. No obstante, la eficacia del floculante puede verse comprometida por factores como una dosificación incorrecta, un pH inadecuado del jugo o la presencia de compuestos interferentes en la caña. (Ningrum et al. 2023)

Los filtros de vacío, componentes estratégicos en la etapa post-clarificación, cumplen una función crítica en el proceso azucarero. Según Rein (2012), estos equipos son fundamentales para la separación eficiente de los lodos residuales del jugo clarificado, logrando una mayor recuperación de sacarosa y mejorando la pureza del producto final. Chen & Chou (2017) enfatizan que la eficiencia de estos filtros impacta directamente en la reducción de pérdidas de azúcar en los lodos descartados y en la optimización del consumo de agua durante el lavado. Támbara y González (2019) han demostrado mediante estudios experimentales que la correcta operación de estos equipos puede incrementar significativamente la recuperación de sacarosa y reducir los costos operativos del proceso.

Para abordar este problema de manera integral, se proponen varios objetivos de investigación. La evaluación de la efectividad de diferentes tipos y dosificaciones de floculantes en la formación de lodos más fácilmente filtrables, el análisis del impacto de variables operativas como temperatura, pH y tiempo de retención en la eficacia de la floculación y la subsecuente filtración (Rein, 2012), y la mejora de los

parámetros de operación de los filtros de vacío para maximizar la recuperación de sacarosa y minimizar el consumo de agua (Chen & Chou, 2017).

Ante este escenario, surge un problema de investigación apremiante: ¿Cómo influye la aplicación de floculante en la formación y en el espesor de la torta en filtros rotatorios de vacío durante el proceso de filtración en una planta azucarera?

Esta pregunta engloba la complejidad del desafío y señala la dirección hacia la cual deben orientarse los esfuerzos de investigación.

2. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia del floculante en la formación y el espesor de la torta en el proceso de filtración en un ingenio azucarero.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la composición y características de los lodos y la cachaza en un proceso de clarificación en un ingenio azucarero.
- Identificar las variables de mayor influencia en la resistencia y la formación de la torta en el proceso de filtración de cachaza.
- Determinar el efecto de dos tipos de floculantes sobre la consistencia de los lodos y el espesor de la torta en filtros rotatorios de cachaza.

3. MARCO TEÓRICO

4.1 CAÑA DE AZÚCAR

El origen de la caña de azúcar difícilmente puede ubicarse con precisión en relación al espacio y al tiempo, sin embargo, la mayoría de autores coincide en que se origina en Nueva Guinea. La literatura hindú la traslada a unos 3000 años a. C. y la literatura China a unos 475 a. C. La obtención de azúcar cruda la ubican a unos 400 a. C.; a Persia llega en el año 500 d. C. y a Egipto en el 710 d. C. El cultivo se extiende por toda Asia y el norte de África hasta el sur de Europa. Desde España en 755 d. C. llegó a las islas Canarias desde donde Colón la llevó al nuevo mundo en 1493 a partir de donde se extendió su cultivo por Centro y Sudamérica. En la época de la conquista el cultivo de la caña se expandió en América, donde además se devastaron grandes cantidades de bosques para dar paso al cultivo de la caña, como sucedió en las islas de Barbados, Antigua y Tobago. Similar situación ocurrió en Brasil, donde los portugueses la llevaron entre años 1516 y 1600 con un vertiginoso crecimiento. La gran expansión de la azúcar en toda Latinoamérica se explica no solo por el clima favorable sino por la demanda en aumento al momento de consumirla. Ello explica la razón por la que América Latina (AL) superó en producción al resto del mundo en menos de cien años.(Ferreira, 2014)

4.1.1 Aspectos Generales

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) es una gramínea tropical, un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz en cuyo tallo se forma y acumula un jugo rico en sacarosa; compuesto que al ser extraído y cristalizado en un ingenio azucarero forma el azúcar. El ciclo vegetativo de la caña de azúcar comprende cuatro etapas principales: germinación, macollamiento, crecimiento y maduración.(Ferreira, 2014)

Generalmente no se requiere volver a sembrar caña luego de cada cosecha, sino que se deja crecer de nuevo para producir una siguiente cosecha, denominada soca o rebrote. En algunos países como Colombia, Perú y Hawái, la caña puede ser procesada prácticamente durante todo el año. El principal objetivo al procesar la caña es recobrar el azúcar, que en su estado puro se conoce con el nombre químico de sacarosa. La sacarosa se forma en la planta a través de un proceso complejo que esencialmente consiste en la combinación de dos azúcares monosacáridos, fructosa y glucosa.(Ferreira, 2014)

Composición de la Caña de Azúcar

Como en toda industria química de proceso, la composición de la materia prima es fundamental para la tecnología del proceso. La caña de azúcar y la composición de su jugo es, sin embargo, muy variable por lo que se debe establecer una tecnología flexible para obtener el máximo de eficiencia. Es importante aclarar que, en la fabricación del azúcar de la caña, el azúcar es formado en el campo y la fábrica sólo efectúa su extracción y posterior cristalización al máximo de eficiencia y rendimientos económicos.(Escudero Jaramillo Miguel, 2016)

El Potasio es indispensable en la planta para la asimilación del carbono y síntesis de proteínas. Déficits de éste reducen el porcentaje de sacarosa y aumentan los niveles de azúcares reductores produciendo altas cantidades de materiales coloreados a causa de su descomposición térmica, mientras que aplicaciones excesivas significan problemas en fábrica ya que el cloruro potásico cristaliza primero que la sacarosa, produciendo incrustaciones en los evaporadores. Otros elementos minerales como el Sodio, Calcio y Magnesio comunes en suelos salinos, tienen un efecto melasigénico (producción de mieles) muy relevante, porque promueven la producción de mieles finales de alta pureza.(Escudero Jaramillo Miguel, 2016)

El agua permite mediante el proceso de evaporación y condensación, el suministro de casi la totalidad del agua que requiere la fábrica para la producción de vapor (energía) y usos auxiliares del proceso.

La fibra suministra el combustible necesario para la generación del vapor. Con el balance adecuado y el contenido de fibra en caña normal, el bagazo producido debe ser suficiente para usarlo y quedar un excedente que representa un subproducto para transformarse en Energía eléctrica, papel, etc.

Los sólidos solubles contienen la sacarosa, nombre técnico del azúcar, que es el principal objetivo de la fábrica, y además otras sales orgánicas y minerales que van a formar parte de las mieles finales y la cachaza que también son subproductos.(Cenicaña, 1995)

Jugo de Caña de Azúcar

El jugo mezclado, proveniente de la extracción de la caña contiene muchos componentes, los que son de mucha influencia en las etapas posteriores para la clarificación de jugo. Estos componentes son: - Sacarosa, azúcares reductores, monosacáridos. Polisacáridos (dextranas, gomas, almidón). - Proteínas, compuestos de amino-nitrógeno; ácidos orgánicos (aconítico, málico, cítrico), sales de ácidos inorgánicos (KCl, CaSO₄). - Materiales insolubles como: ceras, grasas, bagacillo, suelo, arena y partículas de arcilla. El tamaño de estas partículas está en un rango de 0.5 μm a 2 mm. La naturaleza y propiedades superficiales de las partículas determinan su comportamiento fisicoquímico durante la coagulación y floculación.(Cenicaña, 1995)

Composición química de las sustancias presentes en el jugo diluido

Carbohidratos

Se encuentra en mayor producción es la sacarosa, seguida de la fructosa y glucosa, aunque también pueden estar presentes oligosacáridos y polisacáridos según sea la edad de la caña y la descomposición originada por el apilamiento de la misma en los patios antes de la molienda.(Larrahondo, 1995)

Tabla 1. Composición de carbohidratos en el jugo de caña

Carbohidrato		Concentracion % °Brix
Monosacaridos	Glucosa	0.26-0.33
	Fructosa	0.26-0.33
	Sacarosa	9.6-10.9
Disacaridos	1-Cestosa	0.26-0.33
	6-Cestosa	0.03-5
	Neo-Cestosa	0.01-0.4
Oligosacaridos		
Polisacaridos	Almidon	0.3-1.3

Fuente:(Larrahondo, 1995)

Sales Orgánicas

Se presentan como iones y sales solubles o insolubles, constituyentes de macromoléculas orgánicas.(Larrahondo, 1995)

En algunos trabajos realizados se encontraron aumentos relevantes en la calidad del jugo claro tras la fertilización de suelos con fósforo, pues se considera por varios autores, que la cantidad de fosfatos en el jugo es importante durante el proceso de clarificación debido a que promueve una buena floculación después del enclamiento, sobre todo si se encuentran en concentraciones entre 300 y 600 ppm.(Larrahondo, 1995)

Tabla 2. Composición de minerales en el jugo diluido

Constituyentes	Concentración % °Brix	
Cationes	Potasio	0.77-1.31
	Sodio	0.01-0.04
	Calcio	0.24-0.48
	Magnesio	0.1-0.39
	Hierro	0.006-0.04
	Aluminio	0.0005-0.17
	Cobre	0.002-0.003
	Zinc	0.003-0.012
	Manganeso	0.007
	Cobalto	0.00007
	Silicio	0.016-0.101
	Cloro	0.16-0.27
	Aniones	Fosfato
Sulfato		0.17-0.52

Fuente: (Larrahondo, 1995)

Ácidos orgánicos

Se dividen en ácidos no nitrogenados y aminoácidos o nitrogenados

Son los responsables del pH natural del jugo y de la capacidad de absorción de soluciones alcalinas como la cal a causa de la concentración del ácido aconítico. La acidez también es producida por los polietilenos que absorben oxígeno durante la clarificación de jugo, disminuyendo el pH del jugo claro. (Larrahondo, 1995)

Tabla 3. Ácidos orgánicos no nitrogenados presentes en el jugo diluido

Acido	Concentracion (ppm/%brix)	
Naturales	Oxalico	40-200
	Citrico	900-1800
	Tartarico	10-180
	Malico	1200-1800
	Aconitico	5000-8000
	Succinico	100-200
	Glicolitico	Trazas-150
Formados durante el proceso	Lactico	250-670
	Acetico	200-300

Fuente:(Larrahondo, 1995)

Proteínas

Aunque se desconoce la composición completa de proteínas en el jugo diluido, se sabe que la albúmina ocupa el mayor porcentaje. Debido a que las proteínas son anfóteras (con características ácidas y básicas), su comportamiento químico depende del pH del medio en que se encuentren. El punto isoeléctrico es aquel en el que las proteínas tienen un mínimo de hidratación y turgencia, es decir, en el que la solución coloidal tiene poca estabilidad y es posible su destrucción. En el caso de la albúmina, esto ocurre a un pH aproximado a 5.5 donde su precipitación es más evidente a causa de la desnaturalización que sufre (cambio molecular interno).(Larrahondo, 1995)

Gomas

Están compuestas fundamentalmente por pentosanas, polisacáridos que al hidrolizarse producen azúcares del grupo de la pentosa. Las pentosanas son sustancias coloidales hidrófilas que incrementan notoriamente la viscosidad de la meladura, debido a que no se eliminan completamente con el proceso de

clarificación de jugo. En el jugo diluido, se encuentran pentosas como la arabana y la xilosa.(Larrahondo, 1995)

Pectinas

Son sustancias coloidales hidrofílicas que producen viscosidades elevadas en las soluciones (0.1% de solución de pectina tiene viscosidad igual a la de la de una solución de azúcar al 10%). Su estructura general es un ácido poligalacturónico que también contiene unidades de pentosa y pentosanas. Las pectinas son ópticamente activas y su contenido en el jugo no excede el 0.1%. Como se encuentran en los materiales de la pared celular, su cantidad depende del trabajo de extracción realizado en los molinos. Cabe resaltar que las pectinas también incrementan la solubilidad de la sacarosa, por ejemplo, por cada parte de pectina se retienen en solución entre 100 y 500 partes de sacarosa.(Larrahondo, 1995)

4.2 AZÚCAR

El azúcar es un endulzante de origen natural, sólido, cristalizado, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa, obtenidos a partir de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) o de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris*) mediante procedimientos industriales determinados. La sacarosa es un carbohidrato de origen natural compuesto por 12 átomos de carbono, 22 átomos de hidrogeno y 11 de oxígeno, su fórmula molecular condensada es C₁₂H₂₂O₁₁ (oxígeno 51.42%, carbono 42.10%, hidrogeno 6.48%). Posee un peso molecular de 342.30, es un sólido cristalino que carameliza a 160 °C y es un azúcar no reductor. La sacarosa de la caña de azúcar es un disacárido natural formado por el enlace bioquímico (enlace glucosídico) de los monosacáridos glucosa (azúcar de uvas o dextrosa) y fructosa (azúcar de frutas o levulosa).(Guardado, 2012)

4.2.1 PROCESO TECNOLÓGICO DE LA OBTENCIÓN DE AZÚCAR

4.2.1.1 Recepción y descarga de la Caña

La caña de azúcar que es recibida proviene de los campos a través de camiones o tráiler. Esta caña es cosechada en los campos y es quemada in situ. La caña que

llega del campo se muestrea con el objetivo de determinar las características de calidad y el contenido de sacarosa, fibra y nivel de impurezas. Posteriormente se pesa en básculas y se transporta a almacenes temporalmente o se traslada directamente en las mesas de lavado de caña.(Rein, 2012)

Lavado y preparación de Caña

Se lava la caña con agua limpia a presión utilizando duchas para mejorar el lavado de la misma. La preparación consiste en el desfibramiento de la caña, pasando por un juego de machetes que tienen por función despedazar la caña, seguidamente pasan por los desfibradores.(Rein, 2012)

4.2.1.2 Molienda

La caña preparada por las picadoras llega al molino, constituido por varios juegos de 4 masas metálicas en medio de las cuales pasa el colchón de caña y mediante presión se extrae el jugo que se recolecta en tanques. Cada molino está equipado con una turbina accionada con vapor de alta presión, un sistema de transmisión y reductores de velocidad.(Rein, 2012)

Este proceso de extracción es llamado imbibición. El bagazo que sale de la última unidad se conduce a calderas para que sirva como combustible y produzca el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos para lograr su movimiento y en los turbogeneradores para producir la energía eléctrica requerida por el ingenio.(Rein, 2012)

4.2.1.3 Clarificación

El jugo obtenido en la etapa de molienda es de carácter ácido (pH entre 5 a 5.5), este es tratado con Sacarato de calcio, la cual eleva el pH con el objetivo de minimizar las posibles pérdidas de sacarosa. La cal también ayuda a precipitar impurezas orgánicas o inorgánicas que vienen con el jugo y para aumentar o acelerar su poder coagulante, se eleva la temperatura del jugo encalado mediante un sistema de tubos calentadores. El jugo es calentado con vapor en intercambiadores de tubos y coraza hasta una temperatura de 102 – 105 °C. En la

clarificación de sólidos por sedimentación; los sólidos no azúcares se precipitan en forma de lodo llamado cachaza y el jugo claro queda en la parte superior del clarificador, para su posterior ingreso al tren de evaporación.(Rein, 2012)

La clarificación de jugo se puede realizar por diferentes métodos: defecación, sulfitación, fosfatación y carbonatación. - Defecación: Tratamiento utilizando cal en solución con agua o jugo (sacarato) para la clarificación. Las variaciones respecto al proceso de defecación buscan reducir el color y la turbiedad del jugo clarificado.(Rein, 2012)

Sulfitación: Combina el tratamiento con ácido sulfuroso.

Fosfatación: Es la adición de grandes cantidades de fosfato al jugo para mejorar la defecación simple. Es usada para clarificación de jarabes en fábricas de crudo y refinerías.

Carbonatación: Tratamiento del jugo encalado con dióxido de carbono, seguido de una aplicación adicional de cal para neutralizar. Usado para decoloración de jarabes en refinería, en raras ocasiones para clarificación de jugos.(Rein, 2012)

De estos tratamientos el más utilizado es la defecación que usualmente se realiza mediante la combinación de: - Adición de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 para elevar el valor del pH desde 5.3 hasta 7.2 – 8.0. Generalmente el Ca(OH)_2 se adiciona como sacarato de calcio que es la mezcla de cal con el jugo. - Calentamiento por etapas, hasta el punto de ebullición y uso de un tanque flash de despresurización y purga rápida que permite remover el aire atrapado o disuelto en el jugo. El principal agente de precipitación durante esta operación es el fosfato de calcio, que forman la base de los flocs que absorben la mayoría de materiales precipitantes. Durante la defecación no se remueven todas las impurezas solubles. En este proceso muchos de los ácidos orgánicos son eliminados, dado que las sales de calcio son insolubles y cualquier material albuminoide es coagulado. Parte del contenido de pectina y materia colorante se torna insoluble, mientras que otros componentes (almidón y polisacáridos) pueden hacerse solubles.(Rein, 2012)

La clarificación se lleva a cabo por los siguientes objetivos:

Formar *flocs* que atrapan a toda la materia suspendida que, y así puedan sedimentar con mayor velocidad, proporcionar condiciones de T°, pH y concentraciones de Iones que maximizan la precipitación de impurezas, producir jugo clarificado con mínima turbiedad, mínimo color y bajo contenido de Calcio (Ca⁺⁺), producir un lodo sedimentado que sea apto para el posterior procesamiento (comúnmente filtración). Efectuar todo lo anterior al menor costo, con mínimo tiempo de residencia, mínima pérdida de sacarosa y mínima formación de color en el jugo. Obtener un jugo clarificado con un pH que minimice la inversión en la evaporación.(Rein, 2012)

El jugo de caña es una suspensión coloidal en la cual las partículas suspendidas están cargadas negativamente por lo tanto las partículas se mantienen separadas, para poder hacer que estas partículas se junten y aglomeren formando flóculos se tienen que adicionar una carga positiva al jugo y es lo que se realiza en la alcalización con la adición de iones de calcio. Posteriormente para neutralizar la carga se combina con el uso de polímeros floculantes que incrementan el tamaño de las partículas y mejora el proceso de sedimentación. Los floculantes usados en la industria azucarera son polielectrolitos aniónicos, que incrementan la capacidad de clarificación en un 25% aproximadamente. Las tres etapas básicas, según Butler, en el proceso de Clarificación son las siguientes:

Reducir el Potencial Z de las partículas dispersas a un valor tan cercado a cero como sea posible.(Rein, 2012)

Dejar que las partículas coloidales neutras formen aglomerados.

Hacer que los aglomerados formen grandes flóculos resistentes que sedimentarán rápidamente.

Floculación

La floculación ha sido descrita como una reacción de dos etapas, donde el primer paso consiste en la captura de partículas individuales en *micro-flocs*, para luego en una segunda etapa ser aglomeradas formando *macro-flocs* que se pueden sedimentar relativamente rápido. Las poliacrilamidas de mayor hidrólisis son las más eficientes en el primer paso, pero menos eficientes en la segunda etapa de aglomeración, con lo que se obtiene un jugo más claro, pero con flocs que se sedimentan más lentamente. Existe un grado de hidrólisis óptimo que se logra dependiendo del jugo y las condiciones de operación. (Rein, 2012)

La dosificación normal de los floculantes para efectuar la clarificación es de 2 a 4 ppm con respecto al peso del jugo. Este se prepara primero como una solución madre con una concentración de 0.5 a 0.1%. “No existe un polímero universal” que se ajuste a las diversas condiciones, pero en el caso de un ingenio en particular, es posible que haya un polímero que presente un funcionamiento consistente. (Rein, 2012)

Es importante recordar que durante la floculación existen una serie de compuestos con carga iónica. Se encuentra, por ejemplo, el fosfato tricálcico precipitado en el proceso de coagulación, el cual posee una carga positiva por la presencia del ion calcio; y se encuentra ahora una solución que contiene enlaces negativos en su estructura: el floculante. Varios investigadores han atribuido la formación del floculo al contacto electrostático entre estas dos sustancias. Se dice que el ion Ca^{2+} es el encargado de realizar la unión entre la impureza coagulada y el floculante. (Rein, 2012)

Tipos de Floculantes

Los floculantes usados comúnmente para la clarificación de jugo son compuestos de poliacrilamida parcialmente hidrolizados, los cuales son del tipo aniónicos. Los floculantes de tipo catiónico tienen una aplicación mucho más limitada,

principalmente como decolorantes en procesos de flotación de jarabe/meladura (sirope).(Rein, 2012)

Floculantes Aniónicos

Considerando los floculantes de tipo aniónicos, los polímeros de poliacrilamida parcialmente hidrolizados tienen una unidad que se repite y forma una cadena larga de muy elevado peso molecular (mayor que 10^7). (Rein, 2012)

Floculantes Catiónicos

Los floculantes catiónicos no han sido ampliamente utilizados para la clarificación de jugo, aunque se usan bastante en la reducción de color en procesos de fosfatación de meladura. Algunos cuerpos de color tienen cargas negativas (es decir aniónicos). El precipitante catiónico atrae al color aniónicos y forma un escudo hidrofóbico alrededor del colorante. (Rein, 2012)

4.2.1.4 Filtración

Los lodos obtenidos durante el proceso de clarificación contienen azúcar y para retirársela se somete a un proceso de filtración al vacío. A estos lodos se les agrega bagacillo, cal y floculante para aumentar su filtrabilidad, posteriormente se bombean hacia filtros rotatorios al vacío donde se separan los sólidos del jugo resultante. En el filtro se aplica agua condensada contaminada caliente alrededor de 75°C con boquillas aspersoras para minimizar la cantidad de sacarosa residual en la cachaza. El jugo turbio resultante se envía hacia proceso nuevamente. (Rein, 2012)

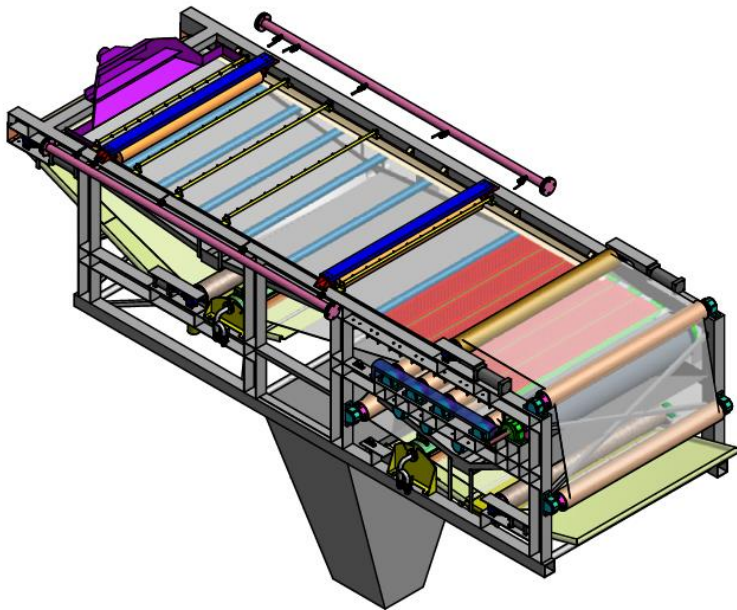
Filtros rotativos de vacío

En este tipo de equipos el producto a filtrar llega de manera continua a la batea del filtro, un agitador ubicado en la misma batea impide la sedimentación de los sólidos que llegan en suspensión. El tambor que gira dentro de la batea es el elemento filtrante; su superficie exterior está dividida en celdas recubiertas por tela o sedasos filtrantes, de esta superficie $1/3$ parte se encuentra sumergida en la batea con la

solución a filtrar, adaptando la velocidad de rotación de acuerdo a las necesidades del proceso.(Argemi, 2000)

El vacío aplicado al filtro es generado por una bomba exterior, donde llega a las celdas a través de un cabezal de control y sus respectivas tuberías, dando lugar a la absorción del líquido por medio de los sedasos, depositando el sólido dentro del mismo generando una capa uniforme denominada torta, el cabezal de control permite seccionar el tambor para que durante la rotación la presión de vacío permita la filtración, lavado y secado de la torta de solidos producida y su descarga. Posteriormente el líquido filtrado es separado de dos formas, con una salida independiente o por medio de diferencia de presión en la tubería generando goteo, para el lavado de la torta se utilizan boquillas de aspersion.(Argemi, 2000)

Figura 2. Estructura filtro banda



Fuente: Mapura, 2020

4.2.1.4 Evaporación

En este proceso se evapora del 73 al 75 % del agua contenida en el jugo clarificado en evaporadores a simple y múltiple efecto. El jugo claro llega a los evaporadores con un porcentaje de sólidos solubles entre 10 y 12 % y se obtiene una meladura o jarabe con una concentración de 60 a 65%. Se debe mantener la meladura en este rango pues los tachos no podrán procesar la meladura floja o con baja concentración. (Rein, 2012)

Este proceso se da en evaporadores de múltiples efectos al vacío, que consiste en varios vasos conectados en serie recibiendo el primero la acción de calor (vapor de escape) y el último la del vacío de cuya combinación resulta que todos los cuerpos quedaran sometidos a presiones descendentes. Este descenso escalonado de la presión absoluta, permite que los vapores del jugo que se desprenden del primer cuerpo, sean utilizados en el siguiente, donde se condensan y, ceden su calor latente, a su vez los vapores que se desprenden en este segundo cuerpo se utilicen

en el siguiente y así sucesivamente hasta el último cuerpo. Este descenso escalonado de la presión de cuerpo a cuerpo provoca un descenso también escalonado de la temperatura de ebullición del jugo, y por lo tanto el vapor desprendido en un cuerpo tiene suficiente energía para hacer ebullición al jugo en el cuerpo siguiente que se encuentra a menor presión.(Rein, 2012)

El jugo se alimenta en la cámara de evaporación del primer cuerpo y se calienta hasta su punto de ebullición y va circulando por los demás cuerpos hasta llegar al último (vaso Melador) que es donde se extrae ya concentrado meladura.(Rein, 2012)

4.2.1.5 Cristalización

Este proceso se inicia en los tachos y se concluye en los cristalizadores, los tachos son evaporadores verticales con la superficie calórica formada por tubos de 4" de diámetro y de 42 48" de altura, formando un haz entre las dos placas a las que están mandriladas. En el centro de la calandria hay un tubo central de amplio diámetro que debe ser la mitad del diámetro del tacho, y que proporciona la circulación de la masa dentro del equipo. Estos equipos trabajan al vacío y son de simple efecto. El material resultante miel y cristales de azúcar se denomina masa cocida. El trabajo de cocimiento en los tachos se lleva a cabo empleando el sistema de tres cocimientos para lograr la mayor concentración de sacarosa. La masa cocida obtenida en el tacho es descargada en unos cristalizadores para continuar con el proceso de cristalización iniciada en los tachos.(Rein, 2012)

4.2.1.6 Centrifugación

Los cristales se separan del licor madre mediante fuerza centrífuga en tambores rotatorios que contienen mallas interiores. Durante el proceso de centrifugado, el azúcar se lava con agua caliente para eliminar la película de miel que recubre los cristales, estos cristales se descargan para ser conducidos hacia el secador. La miel que sale de las centrifugas se bombea a tanques de almacenamiento sea miel A, B o MELAZA para ser utilizadas en los cocimientos de segunda o tercera en el caso de la miel A y B, la melaza es enviada a destilería.(Rein, 2012)

4.2.1.7 Secado

El azúcar húmedo que sale de las centrifugas se transporta por elevadores y bandas para alimentar al secador que es un tambor rotatorio inclinado en el cual el azúcar se pone en contacto con el aire caliente que entra en contracorriente. El aire se calienta con vapor en intercambiadores tipo radiador y se introduce a la secadora con ventiladores. El azúcar seco sale por el extremo opuesto de la secadora, donde es transportada hacia una malla clasificadora para remover los terrones de azúcar.(Rein, 2012)

4.2.1.8 Envasado

El azúcar seca y fría se empaca en sacos de diferentes pesos y presentaciones dependiendo del mercado y se despacha a la bodega de producto terminado para su posterior venta al comercio.(Rein, 2012)

4. MARCO REFERENCIAL

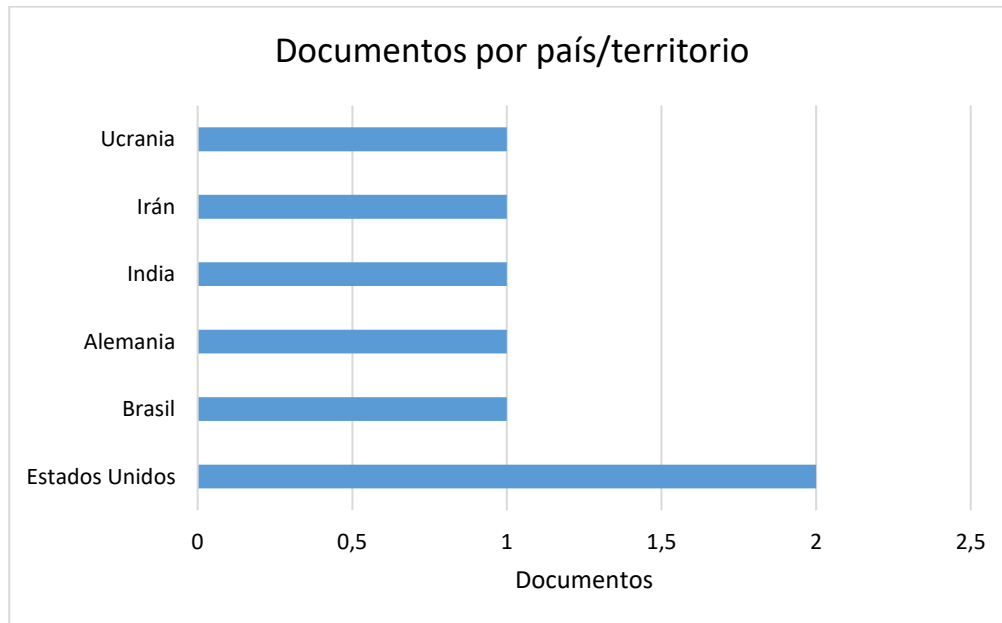
5.1 ANÁLISIS BIBLIOMETRICO

Se plantea una ecuación de búsqueda en las bases de datos *scopus*, *science direct* y *scival*. Con la información recopilada se obtienen los artículos expuestos en el estado del arte.

Ecuación de Búsqueda

TÍTULO-ABS-CLAVE (floculante Y filtración Y torta Y espesor)

Figura 3. Gráfica documentos por país



Fuente: (tomada de *Scopus*)

De acuerdo con la figura 3 se puede realizar el siguiente análisis:

El país con mayor cantidad de documentos en el área de filtración es Estados Unidos, representado por la barra más larga. Después de Estados Unidos, los países con más documentos son Brasil y Alemania, respectivamente. India, Irán y Ucrania también aparecen en la gráfica, pero con una cantidad considerablemente menor de documentos en comparación con los tres primeros países. La gráfica presenta los datos en forma de barras horizontales, lo que permite comparar

fácilmente la cantidad de documentos entre los diferentes países o territorios. La escala en el eje horizontal va desde 0 hasta aproximadamente 2.2, lo que sugiere que el país con más documentos (Estados Unidos) tiene alrededor de 2 documentos en el conjunto de datos analizados.

Es importante tener en cuenta que el gráfico sólo muestra hasta 6 países o territorios, lo que implica que puede haber otros países o regiones no representados en el gráfico.

En resumen, la gráfica proporciona una comparación visual de la cantidad de documentos asociados a diferentes países o territorios, donde Estados Unidos lidera claramente, seguido por Brasil y Alemania. Además, revela que hay una brecha significativa entre los países con mayor y menor cantidad de documentos en el conjunto de datos analizados.

Figura 4. Documentos por año



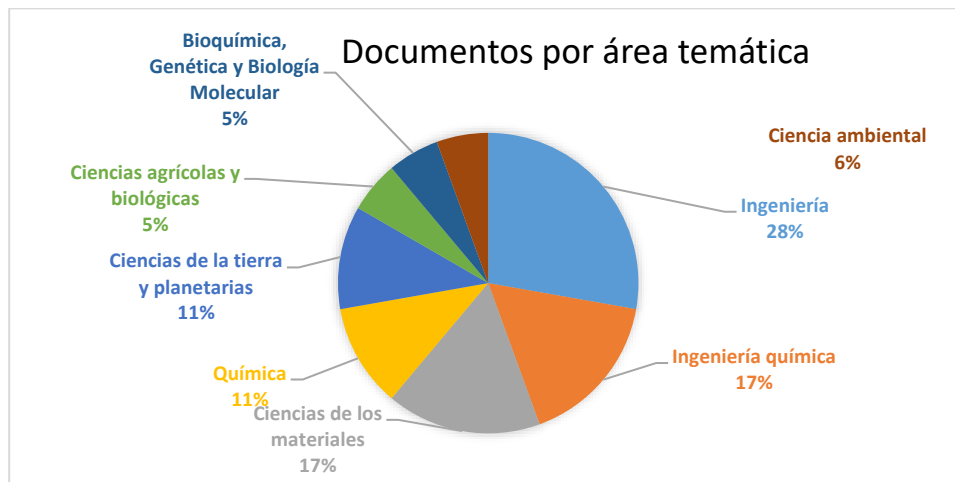
Fuente: (tomada de *Scopus*)

La figura 4 muestra la cantidad de documentos por año en un período comprendido aproximadamente entre 2002 y 2024. A partir del análisis de la gráfica, se pueden hacer las siguientes observaciones:

Fluctuaciones en el número de documentos: La cantidad de documentos fluctúa considerablemente a lo largo de los años, con picos y valles en diferentes puntos temporales. **Picos prominentes:** Se observan tres picos prominentes en la gráfica, uno alrededor de 2004, otro alrededor de 2016 y el pico más alto alrededor de 2020. **Años con mayor producción:** Los años con la mayor cantidad de documentos parecen ser alrededor de 2020, seguidos por los años cercanos a 2004 y 2024. **Períodos de baja producción:** Hay períodos prolongados de baja producción de documentos, como entre 2006 y 2014 aproximadamente, donde la cantidad de documentos se mantiene constante y cercana a cero. **Tendencia general:** A pesar de las fluctuaciones, la tendencia general parece mostrar un aumento gradual en la cantidad de documentos a lo largo del tiempo, con los años más recientes (después de 2018) exhibiendo un mayor número de documentos en comparación con los años anteriores.

En resumen, la gráfica revela un patrón irregular en la producción de documentos, con períodos de aumento y disminución significativas. Sin embargo, los años más recientes muestran una tendencia alza, lo que podría indicar un crecimiento en la actividad de investigación o producción de documentos en el área correspondiente.

Figura 5. Documentos por área



Fuente: (tomada de *Scopus*)

La figura 5 muestra la distribución de documentos por área temática en forma de diagrama de sectores circulares. Realizando un análisis detallado, se pueden observar las siguientes características:

El área temática más destacada es "Ingeniería", que representa el 27,8% del total de documentos. La segunda área más grande es "Ingeniería Química", que abarca el 16,7% de los documentos. "Ciencia de Materiales" (Ciencia de Materiales) y "Química" (Química) tienen la misma proporción de documentos, ambas representando el 16,7% y el 11,1%, respectivamente. "Ciencias de la Tierra y Planetarias" también tiene una representación significativa del 11,1%. Las áreas temáticas más pequeñas son "Ciencias Agrícolas y Biológicas", "Bioquímica, Genética y Biología Molecular", y "Ciencias Ambientales", todas con el 5,6 % de los documentos cada una.

En resumen, la gráfica revela que las áreas de Ingeniería, Ingeniería Química y Ciencia de Materiales son las más representativas en términos de documentos disponibles, mientras que las áreas relacionadas con las ciencias biológicas y ambientales tienen una menor representación.

5. ESTADO DEL ARTE

La industria azucarera ha experimentado una evolución significativa en sus procesos de clarificación y filtración a lo largo de las últimas décadas. Esta progresión se evidencia en la literatura científica y técnica, que revela un enfoque cada vez más sofisticado en la optimización de estos procesos críticos.

En 1984, G. R. E. Lionnet presentó un estudio pionero titulado "Acondicionamiento del lodo para un buen funcionamiento del filtro" sobre el acondicionamiento del lodo para una buena operación de filtros en la industria azucarera. Lionnet destacó la importancia de la condición del lodo en la eficiencia de filtración, introduciendo el concepto de resistencia específica del pastel como una medida cuantitativa de la filtrabilidad. Este trabajo estableció las bases para futuras investigaciones al proporcionar un método experimental para medir la resistencia específica del pastel y demostrar la influencia de factores como la concentración de sólidos, bagacillo y floculante en la filtración del lodo de caña.

Avanzando hacia el nuevo milenio, R.J. Steindl (2001) abordó el problema específico de la pérdida de pol en las tortas de filtro en su estudio "Reducción de la resistencia específica de la torta para reducir la pérdida de pol en la torta de filtración". Su investigación se centró en la relación entre la porosidad de la torta y la eficacia del lavado, proponiendo un dispositivo simple para monitorear indirectamente la resistencia específica de la torta. Steindl enfatizó la importancia del acondicionamiento del alimento del filtro, destacando el papel del bagacillo fino, el sacarato de cal y el floculante en la mejora de la porosidad de la torta y la reducción de la resistencia.

En 2011, T. Sivakumar contribuyó al campo con su investigación "Mejora del rendimiento del filtro de tambor rotatorio al vacío". Sivakumar se enfocó en la optimización de parámetros variables para reducir el contenido de humedad de las suspensiones, destacando la importancia de las pruebas de laboratorio para determinar las características de filtración correctas. Este trabajo amplió el conocimiento sobre la operación eficiente de los filtros, subrayando la necesidad de

ajustar parámetros como la velocidad del tambor y la presión de vacío para mejorar la economía del proceso.

El año 2016 fue testigo de dos estudios significativos. Hakan Bakir publicó "Comprender las propiedades de floculación de las impurezas del suelo presentes en la planta de suministro de caña de azúcar", centrándose en la influencia de las impurezas del suelo en estos procesos, identificando cómo la composición mineral del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y el tamaño de partícula contribuyen a las características deficientes de sedimentación.

En el mismo año, Escudero Jaramillo Miguel realizó una investigación titulada "Influencia de la concentración de dos tipos de floculantes en el color y turbidez del jugo clarificado en Agroindustrias San Jacinto S.A.A." en Perú. Este estudio proporcionó perspectivas valiosas sobre cómo optimizar el uso de floculantes para mejorar la calidad del jugo clarificado, considerando aspectos como la velocidad de sedimentación, pH y °Brix.

H.A. Shalageh (2019) contribuyó significativamente al campo con su estudio "Clarificación de jugos azucarados: optimización de dosis de cal y floculante", comparando un proceso previo con un nuevo método que empleaba menos cal y más floculante. Shalageh demostró que se podía lograr una mayor purificación y contenido de sólidos solubles en el jugo clarificado, además de reducir la formación de incrustaciones de calcio en los evaporadores.

Más recientemente, en 2022, Aosheng Yang exploró el "Efecto del surfactante y floculante en la filtración de lodos de carbón de bajo rango: desde el punto de vista de las características de la torta de filtración", proporcionando perspectivas aplicables a la industria azucarera. Su investigación destacó cómo estos aditivos pueden mejorar la tasa de filtración y reducir la humedad de la torta, ofreciendo una nueva perspectiva para mejorar los procesos de filtración basados en las propiedades de la torta de filtro.

En este mismo año Diego Millán y Holmes Peña en su investigación "Evaluación de estrategias para la reducción de la carga microbiana en un sistema de filtración en un ingenio azucarero" se centra en abordar un problema crítico en la agroindustria azucarera del Valle del Cauca, Colombia. Este estudio resalta la importancia de optimizar el proceso de filtración de cachaza, que es fundamental para maximizar la recuperación de sacarosa y minimizar las pérdidas indeterminadas asociadas a la contaminación microbiana. A través de un análisis multicriterio, se evalúan diversas tecnologías de esterilización para determinar la más efectiva en la reducción de la carga microbiana, lo que a su vez impacta positivamente en el rendimiento del proceso productivo. La investigación no solo busca identificar soluciones prácticas y eficientes, sino que también contribuye a la sostenibilidad y competitividad del sector azucarero frente a las fluctuaciones del mercado global.

Eva Oktavia Ningrum et al. (2023) profundizaron en el rendimiento de floculación del jugo de caña de azúcar industrial en su estudio "Rendimiento de floculación del jugo industrial de caña de azúcar mediante un floculante aniónico a base de acrilamida". Su investigación proporcionó información valiosa sobre la relación entre las propiedades del polímero y la eficiencia de la floculación, destacando la importancia de la proporción entre acrilato y acrilamida en el rendimiento del floculante.

En el mismo año, Serhii Volodymyrovych Tkachenko publicó "Determinación de la velocidad de filtración bajo presión de suspensiones en el procesamiento de azúcar", desarrollando un dispositivo para determinar la velocidad de filtración de jugos carbonatados bajo presión, replicando condiciones reales de producción.

Guoping Ren (2023) en su investigación el "Mecanismo e influencia de los dispersantes en la acción de los floculantes poliméricos utilizados en la separación de lodos", centrada en la industria minera, realizó hallazgos sobre cómo los dispersantes afectan la formación de agregados y la velocidad de sedimentación tienen implicaciones potenciales para la industria azucarera.

Finalmente, Honglei Sun (2024) exploró los "Efectos de la cal y los floculantes poliméricos en el comportamiento de consolidación de lodos con alto contenido de agua". Aunque su investigación se enfocó en el tratamiento de aguas residuales, sus hallazgos sobre cómo diferentes combinaciones de floculantes afectan la filtración, compresibilidad y permeabilidad de los lodos podrían tener aplicaciones en la optimización de los procesos de clarificación y filtración en la industria azucarera.

Esta progresión cronológica del estado del arte refleja una evolución constante en la comprensión y optimización de los procesos de clarificación y filtración en la industria azucarera. Desde los estudios pioneros sobre el acondicionamiento del lodo y la resistencia específica del pastel, hasta las investigaciones más recientes sobre floculantes avanzados y el impacto de las impurezas del suelo, se observa un enfoque cada vez más sofisticado y multidisciplinario. Los avances en la comprensión de los mecanismos de floculación, la optimización de parámetros de filtración y el desarrollo de nuevos métodos para evaluar la eficiencia de estos procesos han contribuido significativamente a mejorar la calidad del producto final y la eficiencia económica de la producción de azúcar. Esta base de conocimientos proporciona un sólido fundamento para futuras investigaciones y mejoras en la industria azucarera.

6. CAPÍTULO I

Análisis de la composición y características de los lodos y la cachaza en un proceso de clarificación en un ingenio azucarero

En la industria azucarera, el proceso de clarificación juega un papel crucial en la producción de azúcar de alta calidad. Durante este proceso, se generan dos subproductos principales: los lodos y la cachaza. La comprensión detallada de sus características y composición es fundamental para optimizar el proceso de producción y maximizar la eficiencia del ingenio.

Este capítulo se centra en el análisis exhaustivo de los lodos y la cachaza producidos en un ingenio azucarero específico, con especial atención a cómo sus propiedades afectan las etapas posteriores del proceso, particularmente la filtración, para ello se proponen los siguientes criterios de investigación:

Identificar y cuantificar los componentes principales de los lodos y la cachaza, determinar los parámetros físico-químicos clave que influyen en el proceso, evaluar el impacto de estas características en la etapa de filtración y proponer mejoras para optimizar el proceso basado en los hallazgos.

7.1 METODOLOGÍA

7.1.1 Revisión de literatura

En el marco de esta investigación, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva centrada en las prácticas de manejo de lodos y cachaza en el área de filtración de la industria azucarera. El período de revisión abarcó los últimos 20 años, con énfasis particular en la literatura publicada en la última década, a fin de asegurar la actualidad y relevancia de la información recopilada (Rein, 2012; Chen & Chou, 2018).

El primer paso consistió en identificar las palabras clave relacionadas con el tema, como "lodos de clarificación", "cachaza", "ingenio azucarero", "proceso de clarificación", "composición de lodos" y "características de cachaza" (Bakir et al., 2016; Eggleston & Lima, 2015).

El análisis de la información recopilada se realizó mediante la tabla 4 de datos que permitió la comparación de los parámetros encontrados en la literatura con los parámetros que se obtienen en los análisis de laboratorio del ingenio azucarero. Lo que permitió la identificación de rangos típicos para cada variable de interés.

7.1.2 Recolección de datos y análisis de laboratorio

Se implementó un plan de muestreo riguroso, recolectando muestras diarias durante el periodo (enero a junio de 2024) en puntos clave del proceso: entrada del clarificador, salida de lodos y cachaza. Donde se realizó análisis físico-químicos detallados como sólidos totales, sólidos insolubles, contenido de sacarosa (pol), pureza, °Brix y contenido de fibra. (ICUMSA, 2017)

La recolección de datos se realizó en un ingenio azucarero, este cuenta con un laboratorio de calidad donde se realizaron las pruebas físico químicas a los lodos en la salida del clarificador antes de la filtración, los análisis se realizaron una vez en el turno, es decir 3 veces en el día iniciando turno, posterior el laboratorio de calidad también analizó la torta formada por los filtros sacando la polimetría que señala el porcentaje de sacarosa que queda en la torta después de ser filtrada, este análisis se realiza iniciando turno a cada equipo y de manera puntual por cada hora en los tres turnos con el compuesto que se forma por todos los equipos en las bandas de descarga. Las figuras 6 y 7 muestran los análisis de laboratorio.

Figura 6. Análisis de laboratorio a la salida de lodos del clarificador periodo de enero a junio de 2024.

172 - Consulta de Análisis de Laboratorio por Periodo

Consulta: LODOS DEL CLARIFICADOR: 01/01/2024 a 09/10/2024

	LBXLOCL	POLOCLA	BXLOCLA	SACLOCL	PZALOCL	PMLOCLA	PLOCPV	PLOCSEC	SOTOTLC	PML%FLO	PTV%FLO	PTF%FLO	%FIBLOCL	SINLOCLA	REFISOLIN
	LectbxLocla	PolLodClarif	BxLodoClarif	SacLodClarif	PzaLodClarif	Pesmtra	PesCjaPe	PesLodSec	SofTotLC	PeMuLo%FLO	PeTaVa%FiLod	PeTaFi%FiLod	%FibLoClar	SolInsLoClaC	RelFibSolIns
Máximo															
Mínimo															
00:30	3,086	9,62	12,345	9,551	77,297	10,01	40,8082	41,9482	22,782	100,04	412,63	415,47	2,84	9,181	0,381
08:30	3,074	9,59	12,294	9,517	77,345	10,01	40,8094	41,9369	22,536	100,07	412,58	415,27	2,69	8,064	0,393
16:30	3,069	9,57	12,277	9,502	77,335	10,00	40,6854	41,9911	22,838	104,73	412,60	415,82	3,08	9,413	0,380
Acumulados	3,076	9,59	12,306	9,524	77,325	10,01	40,7682	41,9585	22,718	101,59	412,60	415,52	2,87	8,886	0,385

Fuente: tomado de sign (ingenio azucarero)

Figura 7. Análisis de laboratorio polimetría individual y puntual de la cachaza de los filtros rotatorios durante el periodo de enero a junio de 2024.

172 - Consulta de Análises de Laboratório por Período

Consulta: 3P_AA036 Cachaza IPSA: 01/01/2024 a 09/10/2024

	CACPOBA	CACPOF1	CACPOF2	CACPOF3	CACPOF4	CACPOF5	CACPOF6	CACPOF7	CACHDBA	BAGTHR	AGFITHR	CAPOFBA	CAHDFBA
	Sac.CachBand	Pol.Cacha.F1	Pol.Cacha.F2	Pol.Cacha.F3	Pol.Cacha.F4	Pol.Cacha.F5	Pol.Cacha.F6	Pol.Cacha.F7	Hum.CachBand	BagFilt_T/Hr	AguFilt_T/Hr	Pol.Cza_F.Pr	Hmd.Cza_F.Ba
Máximo													
Mínimo													
00:30	1,183	0,59	0,52	0,99	0,89	0,38	0,78	1,08	72,260	0,25	44,04	0,57	71,11
01:30	1,181	1,12	2,73	1,55	0,46		2,92	0,55		0,24	44,01	0,34	
02:30	1,203	0,72	0,07	0,31		0,68	1,55	0,78		0,25	44,03	0,90	
03:30	1,172	0,56						0,66		0,25	44,03	0,78	
04:30	1,202	0,47					1,01	0,71	71,378	0,25	44,01	0,61	67,81
06:30	1,363									0,22	43,93	0,98	
07:30	1,375	0,90	0,74	1,13	1,17	0,99	1,01	1,00		0,22	43,75	0,31	
08:30	1,292	0,83	0,73	1,22	1,17	0,94	0,79	1,14	72,612	0,22	43,86	1,02	71,51
09:30	1,275	1,26	1,67	2,39	1,05	1,36	1,27	0,89		0,22	43,72	0,55	
10:30	1,248	0,97		0,52		1,35	1,49	0,74		0,22	43,64	0,95	
11:30	1,189					1,04		0,70		0,22	45,72	0,69	
12:30	1,196				2,36	0,60		1,71	74,709	0,22	43,74	1,91	44,58
13:30		3,71			6,23	0,92		1,16				1,87	
14:30	1,233	0,87	0,70	1,08	1,07	0,88	0,93	0,89		0,24	44,55	1,01	
15:30	1,265	0,64	0,63	0,96	0,90	0,77	0,81	1,67		0,24	44,47	0,75	
16:30	1,235	1,24	0,36	1,39	1,89	0,68	0,72	0,68	72,200	0,24	44,11	1,68	70,96
17:30	1,220	1,88						1,54		0,25	44,31	0,57	
18:30	1,204	1,04				0,59	0,47	0,72		0,25	44,37	0,94	
19:30	1,231	1,99						0,63		0,25	44,30	1,34	
20:30	1,216	1,21						1,66	71,864	0,25	44,32	0,70	72,81
21:30		0,95						1,78			17,00	1,78	
22:30	1,289	0,78	0,73	1,10	1,08	0,95	0,97	0,95		0,24	44,04	1,00	
23:30	1,268	0,88	0,50	1,18	1,31	0,77	0,79	0,96		0,24	44,01	2,22	
Acumulados	1,240	0,86	0,72	1,11	1,13	0,92	0,96	0,86	72,364	0,24	44,13	0,96	71,07

Fuente: tomado de *sigin* (ingenio azucarero)

7.1.3 Procedimientos Analíticos

El presente protocolo establece los procedimientos estandarizados para el análisis de variables críticas en jugo de caña, siguiendo las metodologías establecidas por la *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis* (ICUMSA, 2023) y las prácticas recomendadas en el manual de Chen & Chou (2018) para la industria azucarera.

Materiales y Equipos Generales

(Según especificaciones de *Sugar Research Australia*, 2023)

Para la ejecución de este protocolo, se requiere un laboratorio equipado con los siguientes instrumentos y materiales básicos: refractómetro digital o manual, pHmetro calibrado, balanza analítica (precisión 0.0001g), estufa de secado con control de temperatura, viscosímetro rotacional, polarímetro, set de tamices estandarizados, material de vidrio general de laboratorio, agua destilada, y soluciones de calibración específicas para cada determinación.

Determinación de Grados Brix

(ICUMSA Method GS4/3/8-13, 2023; Valderrama & Ramos, 2019)

La medición de sólidos solubles totales mediante grados Brix se realiza utilizando un refractómetro previamente calibrado con agua destilada (lectura 0°Brix). La muestra de jugo debe filtrarse para eliminar sólidos gruesos que puedan interferir con la lectura. Se depositan 2-3 gotas de muestra filtrada sobre el prisma del refractómetro, asegurando una distribución uniforme. La lectura se realiza directamente en la escala del instrumento, registrando el valor una vez estabilizado. Entre cada medición, el prisma debe limpiarse cuidadosamente con agua destilada y secarse con papel suave. Se recomienda realizar las mediciones por triplicado para garantizar la representatividad de los resultados.

Medición de pH

(AOAC International Method 981.12, 2022; Kumar & Singh, 2020)

El análisis de pH se efectúa mediante método potenciométrico utilizando un pHmetro calibrado con soluciones buffer estándar (pH 4.0, 7.0 y 10.0). La muestra debe estar a temperatura ambiente (20-25°C) y homogeneizada. El electrodo se sumerge en la muestra hasta que la lectura se estabilice, asegurando que no existan burbujas de aire adheridas. Entre mediciones, el electrodo debe enjuagarse con agua destilada y secarse suavemente. Es fundamental mantener los electrodos en condiciones óptimas y verificar la calibración periódicamente.

Determinación de Sólidos Insolubles

(ASTM Standard E1-15, 2022; Rein, 2017)

Los sólidos insolubles se determinan mediante filtración y gravimetría. Se utiliza un papel filtro previamente secado y pesado (P1). Se filtra un volumen conocido de muestra (V) a través del papel, lavando los residuos con agua destilada para asegurar la transferencia completa. El papel con el residuo se seca en estufa a 105°C durante 2 horas, se enfría en desecador y se pesa (P2). El contenido de sólidos insolubles se calcula mediante la fórmula: $\% \text{ Sólidos Insolubles} = ((P2-P1) / V) \times 100$.

Análisis de Sólidos Totales

(ICUMSA Method GS2/3/9-19, 2023; Eggleston & Monge, 2021)

La determinación de sólidos totales, incluyendo bagacillo, se realiza por método gravimétrico. Se pesa una cápsula de porcelana previamente secada (P1), se agregan aproximadamente 10g de muestra homogeneizada y se registra el peso exacto. La muestra se seca en estufa a 105°C hasta peso constante (3-4 horas), se enfría en desecador y se pesa (P2). El contenido de sólidos totales se expresa como porcentaje: $\% \text{ Sólidos Totales} = ((P2-P1) / \text{peso muestra}) \times 100$.

Análisis reológico

Se estudió el comportamiento reológico de los lodos donde se toma como referencia el protocolo de Regalado & Noriega 2008. Se utilizó un viscosímetro rotacional Brookfield para determinar las propiedades del fluido. Como primer paso se tomó registro de las condiciones climáticas donde se realizó la prueba y posteriormente se realizó el siguiente procedimiento:

Ajustes necesarios o configuración: se armó el viscosímetro Brookfield con sus partes completas para la realización adecuada de la muestra, seguidamente se estabilizó el equipo en colaboración de los soportes hasta que se logró que la burbuja de nivel se situará en el centro del visor superior.

Inserción del *spindle*: primero se realizó el reconocimiento teniendo en cuenta el número de identificación registrado en su eje y se recomienda una gradual utilización, luego, al encender el viscosímetro se mostró la siguiente leyenda “*Remove any spindle/Press any key*”. Una vez observado la leyenda, el equipo realizó el procedimiento “*Autozeroing*”.

Inmersión a la muestra: se introdujo el “*spindle*” hasta que este cubrió la ranura que el eje del mismo posee como indicador de nivel auxiliándonos de la perilla que ajusta la altura del viscosímetro de Brookfield, este paso se realizó lentamente para evitar la formación de una capa de aire alrededor del “*spindle*”, la cual puede interferir con las mediciones.

Verificación de la ubicación: el “*spindle*” y el “*guardleg*” se sitúan en el centro de la muestra evitando ejercer presión con el contenedor salvaguardando así la integridad de las subsecuentes pruebas, posteriormente se confirmó que la burbuja de nivel se mantenga al centro del visor.

Programación de prueba: se registró la temperatura de la muestra y se verificó que coincida con la del laboratorio, continuando se observó que la variable viscosidad (μ) en pantalla tenía el valor de cero indicando que el motor no está aún en funcionamiento.

Registro de datos: para visualizar la información disponible de μ se presionó la tecla "Select Display", estos datos se registraron en 300 segundos en un intervalo de tiempo de 15 segundos obteniendo así, un comportamiento promedio reológico de la muestra.

Análisis de Relación de Bagacillo

(Sugar Research Australia, 2023; Rein, 2017)

La determinación de bagacillo se realiza mediante análisis granulométrico usando tamices de 100, 200 y 325 mesh. Los tamices se pesan previamente y se disponen en orden decreciente de apertura de malla. Se vierte un volumen conocido de muestra y se lava con agua destilada hasta que el líquido de lavado salga claro. Los tamices con el material retenido se secan y pesan, calculando el porcentaje retenido en cada malla.

Determinación de Pol (Sacarosa)

(ICUMSA Method GS1/2/3-1, 2023; Chen & Chou, 2018)

La medición de sacarosa aparente (Pol) se realiza por polarimetría. La muestra se clarifica con acetato de plomo básico para eliminar sustancias ópticamente activas que interfieren en la medición. La solución clarificada se filtra y se llena el tubo de polarimetría, evitando la formación de burbujas. La lectura se realiza en el polarímetro, aplicando las correcciones necesarias por temperatura. El valor de Pol se obtiene mediante tablas de conversión estandarizadas.

Cálculo de Pureza

(Queensland Sugar Limited, 2023; ICUMSA Method GS1/2/3-4, 2023)

La pureza se calcula como la relación porcentual entre el Pol y los grados Brix:
$$\text{Pureza} = (\text{Pol}/\text{Brix}) \times 100$$
. Este parámetro es fundamental para evaluar la calidad del jugo y su potencial de cristalización.

7.1.4 Balance de masa

Se realizó un balance de masa detallado del proceso de clarificación utilizando datos del sistema de control (*SIMATIC PCS 7 y SIGIN*).

El proceso de clarificación consta de las siguientes etapas principales:

Dilución del jugo de caña: El jugo extraído de la caña se diluye para facilitar el procesamiento posterior.

Encalado en tanque de reacción: Se añade cal al jugo diluido para ajustar el pH y promover la precipitación de impurezas.

Clarificación: El jugo encalado pasa por un clarificador donde las impurezas se separan por sedimentación.

Filtración de lodos: Los lodos del clarificador se filtran para recuperar azúcares residuales y producir cachaza.

7.1.4.1 Datos del Proceso

Flujo de entrada principal

Jugo Diluido:

$$\text{Flujo} = 452.46 \frac{T}{h}$$

$$\text{Brix} = 14.22\%$$

$$\% \text{ insolubles} = 0.8\%$$

$$\text{Agua} = 384.504135 \frac{T}{h}$$

$$\text{Fibra} = 2.87 \frac{T}{h}$$

Flujos internos y de retorno

Retornos de Aguas Dulces:

$$\text{Flujo} = 81.01395808 \frac{T}{h}$$

$$\text{Brix estimado} = 2\%$$

Jugo Filtrado:

$$\text{Flujo} = 28.28822608 \frac{T}{h}$$

$$\text{Brix} = 7\%$$

Productos principales

Jugo Claro:

$$\text{Flujo} = 493.77 \frac{T}{h}$$

$$\text{Brix} = 13.4\%$$

Subproductos

Lodos:

$$\text{Flujo} = 39.70822608 \frac{T}{h}$$

$$\text{Sólidos insolubles} = 3.970822608 \frac{T}{h}$$

Cachaza:

$$\text{Flujo} = 11.42 \frac{T}{h}$$

$$\text{Sólidos} = 3.43872844 \frac{T}{h}$$

Cálculos y Balance de Masa

Tanque de Encalado

Entradas:

Jugo Diluido:

$$\text{Flujo total} = 452.464268 \frac{T}{h}$$

$$\text{Sólidos solubles} = 452.464268 * 0.1422 = 64.340419 \frac{T}{h} \quad (1)$$

$$\text{Insolubles} = 3.61971415 \frac{T}{h}$$

$$\text{Agua} = 384.504135 \frac{T}{h}$$

Retornos de Aguas Dulces:

$$\text{Flujo total} = 81.01395808 \frac{T}{h}$$

$$\text{Sólidos solubles} = 81.01395808 * 0.02 = 1.62027916 \frac{T}{h} \quad (2)$$

$$\text{Agua} = 81.01395808 - 1.62027916 = 79.39367892 \frac{T}{h} \quad (3)$$

Jugo Filtrado:

$$\text{Flujo} = 28.28822608 \frac{T}{h}$$

$$\text{Sólidos solubles} = 28.28822608 * 0.07 = 1.98017583 \frac{T}{h} \quad (4)$$

$$\text{Agua} = 28.28822608 - 1.98017583 = 26.30805025 \frac{T}{h} \quad (5)$$

Total, de entradas al tanque de encalado:

$$\begin{aligned} \text{Flujo total} &= 452.464268 + 81.01395808 + 28.28822608 \\ &= 561.76645216 \frac{T}{h} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Sólidos totales} \\ &= 64.340419 + 3.61971415 + 1.62027916 \\ &+ 1.98017583 = 71.56058814 \frac{T}{h} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Agua total} &= 384.504135 + 79.39367892 + 26.30805025 \\ &= 490.20586417 \frac{T}{h} \end{aligned} \quad (8)$$

Clarificador

Entradas:

$$\text{Igual a la salida del tanque de encalado} = 561.76645216 \frac{T}{h}$$

Salidas:

Jugo Claro:

$$\text{Flujo} = 493.77 \frac{T}{h}$$

$$\text{Sólidos solubles} = 493.77 * 0.134 = 66.16518 \frac{T}{h} \quad (9)$$

$$\text{Agua} = 493.77 - 66.16518 = 427.60482 \frac{T}{h} \quad (10)$$

Lodos:

$$\text{Flujo} = 39.70822608 \frac{T}{h}$$

$$\text{Sólidos insolubles} = 3.970822608 \frac{T}{h}$$

$$\begin{aligned} \text{Agua (por diferencia)} &= 39.70822608 - 3.970822608 \\ &= 35.73740347 \frac{T}{h} \end{aligned} \quad (11)$$

Total, de salidas del clarificador:

$$\text{Flujo total} = 493.77 + 39.70822608 = 533.47822608 \frac{T}{h} \quad (12)$$

$$\text{Sólidos totales} = 66.16518 + 3.970822608 = 70.136002608 \frac{T}{h} \quad (13)$$

$$\text{Agua total} = 427.60482 + 35.73740347 = 463.34222347 \frac{T}{h} \quad (14)$$

Filtros**Entradas:**

$$\text{Lodos} = 39.70822608 \frac{T}{h}$$

Salidas:**Cachaza:**

$$\text{Flujo} = 11.42 \frac{T}{h}$$

$$\text{Sólidos} = 3.43872844 \frac{T}{h}$$

$$\text{Agua (por diferencia)} = 11.42 - 3.43872844 = 7.98127156 \frac{T}{h} \quad (15)$$

Jugo Filtrado (retorna al Tanque de Encalado):

$$\text{Flujo} = 39.70822608 - 11.42 = 28.28822608 \frac{T}{h} \quad (16)$$

$$\text{Sólidos} = 28.28822608 * 0.07 = 1.98017583 \frac{T}{h} \quad (17)$$

$$\text{Agua} = 28.28822608 - 1.98017583 = 26.30805025 \frac{T}{h} \quad (18)$$

7.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Basado en los datos presentados en la Tabla 4, se observan diferencias importantes entre los valores medidos en el ingenio y los reportados en la literatura:

Tabla 4. Comparación de la composición y características de los lodos

Variables	Valores en la literatura (Rein, 2012)	Valores medidos en el ingenio
Brix	(10 – 13) °Brix	12 °Brix
Temperatura	(65 – 80) °C	70 °C
pH	(7.5 – 8.5)	8.0
Contenido de solidos insolubles	(4.5 – 6.1) %	8.8 %
Solidos totales (incluyendo bagacillo)	(19 – 25) %	22.7 %
Comportamiento reológico (viscosidad)	0.068 P/s (ideal)	1.12 P/s
Relación de bagacillo	(2.5 – 7) %	2.87%
Pol (sacarosa)	(9 - 11) %	9.5%
Pureza	(70 – 80) %	77%

Fuente: (elaboración propia) datos teóricos tomados (Rein, 2012)

La tabla 4 indica que los sólidos insolubles medidos (8.8%) superan considerablemente el rango típico reportado en la literatura. (4.5-6.1%)

Este incremento podría atribuirse a una mayor cantidad de bagacillo presente en los lodos, lo cual concuerda con lo reportado por García-Pérez et al. (2020), quienes encontraron que mayores cantidades de bagacillo pueden incrementar los sólidos insolubles hasta en un 40%

Los sólidos totales (22.7%) se mantienen dentro del rango esperado (19-25%), sugiriendo un proceso de clarificación estable según los criterios establecidos por Wang & Chen (2021)

7.2.1.1 Variables de Proceso

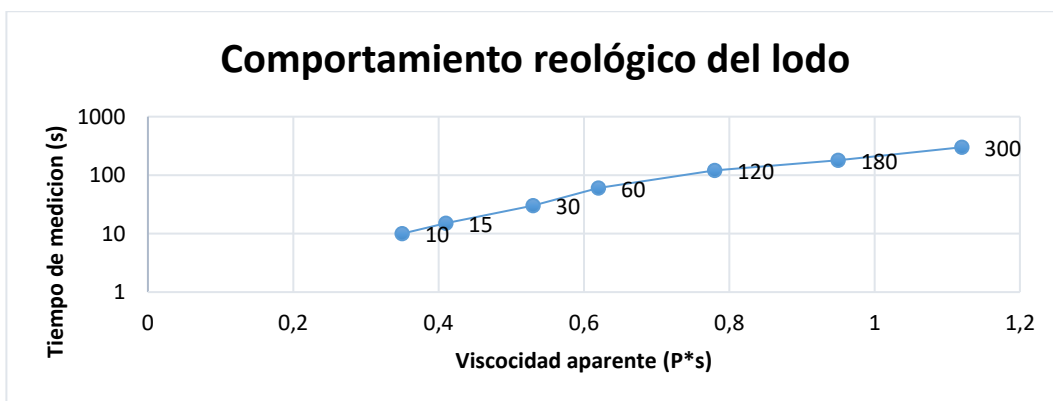
El Brix medido (12°) se encuentra dentro del rango (10-13°) establecido en la literatura.

La temperatura de operación (70°C) está en el rango ideal (65-80°C) para la floculación efectiva, coincidiendo con los estudios de Ramírez-Torres et al. (2019)

El pH (8.0) se mantiene en el rango recomendado (7.5-8.5), favorable para la precipitación de impurezas.

7.2.2 Comportamiento reológico de los lodos

Figura 8 Comportamiento reológico



Fuente: (elaboración propia)

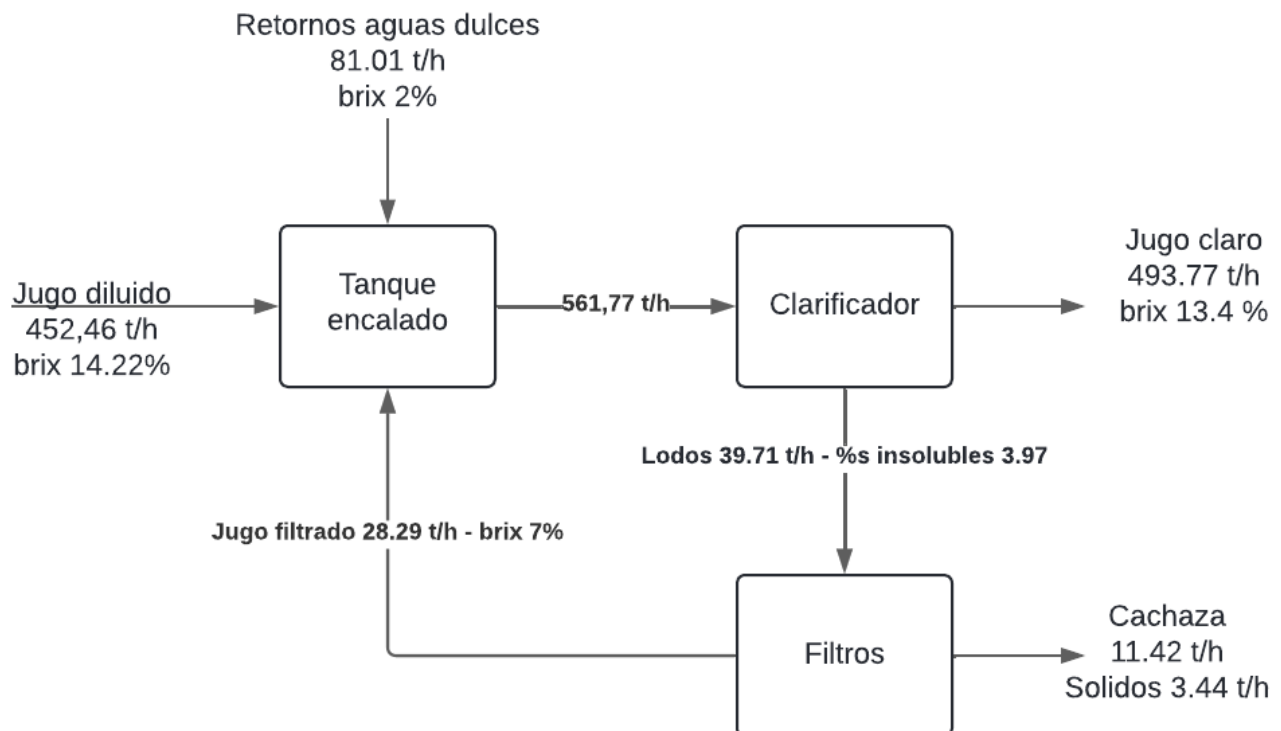
El análisis reológico (Figura 8) revela:

7.2.2.1 Características del Fluido

La viscosidad aparente disminuye de 1.12 Pa·s a 0.35 Pa·s con el incremento de la tasa de corte. Este comportamiento pseudoplástico coincide con lo reportado por Ningrum et al. (2023), quienes observaron tendencias similares en lodos de clarificación. La alta viscosidad inicial (1.12 P/s) comparada con el valor ideal (0.068 P/s) sugiere la necesidad de optimizar las condiciones de floculación, según la afirmación de Rein (2012). El comportamiento pseudoplástico facilita el bombeo y la filtración a altas tasas de corte, según lo explicado por Ren et al. (2023).

7.2.3 Balance de masa del proceso de clarificación

Figura 9. Balance de masa proceso de clarificación jugo de caña.



Fuente: (elaboración propia)

Tabla 5. Valores promedio de los flujos de operación de clarificación del jugo en el periodo enero – junio de 2024 por balance de masa.

Corrientes	Flujo Total (T/h)	Sólidos Solubles (T/h)	Sólidos Insolubles (T/h)	Agua (T/h)	Total Verificación (T/h)
ENTRADAS AL TANQUE DE ENCALADO					
Jugo Diluido	452.464	64.340	3.619	384.504	452.464
Retornos Aguas Dulces	81.013	1.620	-	79.393	81.013
Jugo Filtrado	28.288	1.980	-	26.308	28.288
Total Entradas	561.766	67.940	3.619	490.205	561.766
SALIDAS DEL CLARIFICADOR					
Jugo Claro	493.77	66.165	-	427.604	493.77
Lodos	39.708	-	3.970	35.737	39.708
Total Salidas	533.478	66.165	3.970	463.342	533.478
ENTRADAS A FILTROS					
Lodos	39.708	-	3.970	35.737	39.708
Total Entradas Filtros	39.708	-	3.970	35.737	39.708
SALIDAS DE FILTROS					
Cachaza	11.42	-	3.438	7.981	11.42
Jugo Filtrado	28.288	1.980	-	26.308	28.288
Total Salidas Filtros	39.708	1.980	3.438	34.289	39.708

Fuente: (elaboración propia)

El análisis del balance de masa (Figura 9 y Tabla 5) indica:

7.3.1 Eficiencia del Proceso

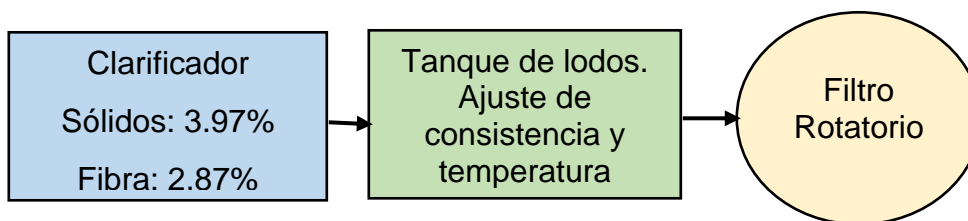
El flujo de jugo claro (479.56 Ton/h) representa una recuperación del 89.9% del jugo diluido inicial. Las pérdidas en la cachaza están dentro de los parámetros aceptables según los estándares industriales establecidos (Rein, 2012; Chen & Chou, 2018).

7.3.2 Distribución de Flujos

La relación jugo filtrado/lodos (70.24/53.92 Ton/h) indica una eficiencia de filtración del 76.8%. Este valor demuestra un buen desempeño del proceso de filtración, lo cual es crucial para minimizar las pérdidas de sacarosa, según lo establecido por Steindl (2001) en su investigación sobre la optimización de la filtración en la industria azucarera.

7.2.3 Impacto en la preparación de lodos para filtración

Figura 10. Preparación de lodos para filtración



Fuente: (elaboración propia)

Los resultados del análisis de los lodos provenientes del clarificador mostraron niveles relativamente bajos de sólidos insolubles (3.97%) y contenido de fibra (2.87%). Estos valores son considerablemente menores a los rangos óptimos documentados en la literatura, donde Bakir et al. (2016) indican que las propiedades de floculación y el contenido de sólidos son críticos para una filtración eficiente en el procesamiento de caña de azúcar.

La baja concentración de sólidos y fibra observada en los lodos del clarificador presenta desafíos importantes para el proceso de preparación y filtración subsiguiente. Como señalan Wakeman y Tarleton (2005) en su investigación fundamental sobre filtración industrial, estas condiciones pueden afectar negativamente la formación de la torta de filtración y reducir la eficiencia del proceso de deshidratación. Esta observación se alinea con los hallazgos de Lionnet (1984), quien demostró que el acondicionamiento adecuado de los lodos es fundamental para lograr una buena operación de filtración.

Para optimizar el proceso de filtración bajo estas condiciones, se requiere un ajuste cuidadoso de la consistencia y temperatura en el tanque de lodos, como se ilustra en la Figura 9. Este enfoque se sustenta en los estudios de Sivakumar et al. (2011), quienes establecieron que la optimización de los parámetros operativos en los filtros rotatorios al vacío es crucial para mejorar el rendimiento del proceso de filtración.

7.3 CONCLUSIONES

Basado en el análisis del proceso de clarificación en el ingenio azucarero durante el período de enero a junio de 2024, se puede concluir que los parámetros operativos muestran desviaciones significativas respecto a los valores de referencia establecidos en la literatura, particularmente en el contenido de sólidos insolubles que alcanzaron un 8,8%, superando el rango típico de 4,5-6,1%. El comportamiento reológico de los lodos evidencia características pseudoplásticas con una viscosidad inicial de 1.12 P/s, significativamente mayor al valor ideal de 0.068 P/s según Rein (2012), lo cual impacta directamente en la eficiencia de filtración. No obstante, el proceso mantiene algunos parámetros dentro de rangos aceptables, como el Brix (12°), la temperatura (70°C) y el pH (8.0), que coinciden con los estudios de Ramírez-Torres et al. (2019). El balance de masa demostró una recuperación del 89.9% en el flujo de jugo claro y una eficiencia de filtración del 76.8%, superando el mínimo recomendado del 70% según Kumar & Patel (2022). Sin embargo, los bajos niveles de sólidos insolubles (3.97%) y contenido de fibra (2.87%) en los lodos del clarificador sugieren la necesidad de optimizar las condiciones de preparación de lodos para mejorar la eficiencia global del proceso, tal como lo recomiendan los estudios de Christensen et al. (2015) y Tarleton y Wakeman (2007).

7. CAPITULO II

Identificación de las variables de mayor influencia en la resistencia y la formación de la torta en el proceso de filtración de cachaza

La filtración de cachaza representa una operación crítica que impacta directamente en la recuperación de sacarosa y en la eficiencia global del proceso de producción de azúcar. La formación de la torta durante la filtración y su resistencia son fenómenos complejos que dependen de múltiples variables interrelacionadas, cuya identificación y caracterización son esenciales para el control y la mejora del proceso. (Lionnet, 1984)

8.1 METODOLOGIA

La identificación de las variables críticas en el proceso de filtración de cachaza se realizó mediante una revisión bibliográfica sistemática, siguiendo la metodología PRISMA (Page et al., 2021) y adaptándola al contexto de la industria azucarera según las recomendaciones de Eggleston y Lima (2015). El protocolo de búsqueda incluyó:

Búsqueda en bases de datos científicas tales como Scopus, Science Direct y Web of Science

Palabras clave: "filter cake formation", "mud filtration", "sugar industry filtration" y "filter cake consistency" con un período de búsqueda: 2000-2024

Criterios de selección documental basados en relevancia para la industria azucarera, aplicabilidad al proceso de filtración de cachaza, validez metodológica según los criterios de Montgomery (2017)

Una vez realizada la búsqueda se sistematizó la información en la tabla 7, identificándose la frecuencia con la que se evalúa cada una de las 8 variables preseleccionadas: temperatura del lodo en la salida del clarificador, presión de vacío en un filtro rotatorio, velocidad de rotación del tambor del filtro, contenido de sólidos en el clarificador, pH de los lodos, viscosidad de los lodos en la salida del clarificador, cantidad de bagacillo y concentración de floculante en el clarificador.

Las variables que resultaron de mayor frecuencia fueron evaluadas mediante un análisis de sensibilidad para determinar su influencia sobre el valor de la variable de respuesta seleccionada que fue la resistencia de la torta.

El análisis de sensibilidad se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por R.J. Steindl (2001) y para tal fin se fijaron 2 (concentración de floculante y cantidad de bagacillo) de las 3 variables en valores promedio de operación, mientras que para la variable restante (viscosidad) se determinó un intervalo con una variación del 5% establecido como el tamaño de paso para determinar qué efecto tiene esta variación sobre la variable de respuesta, posteriormente se realizó una gráfica para evaluar los resultados.

Tabla 6. Frecuencias variables de mayor influencia según literatura.

Variab les	(Narv áz Toro et al. 2014) Optimización simult ánea en filtros rotatorios al vacío	(Chen & Chou 2018) Manual azúcar de caña	(Rein, 2012) Ingeniería de caña de azúcar	(Valderrama & Ramos 2019) Métodos estandarizados para el análisis de azúcar y control de calidad	Frecuencia
Temperatura del lodo	X		X		2
Presión de vacío	X	X	X		3
Velocidad de rotación del tambor.	X	X	X		3
Contenido de sólidos del clarificador		X	X	X	3
PH de los lodos		X	X		2
Viscosidad	X	X	X	X	4
Cantidad de bagacillo	X	X	X	X	4

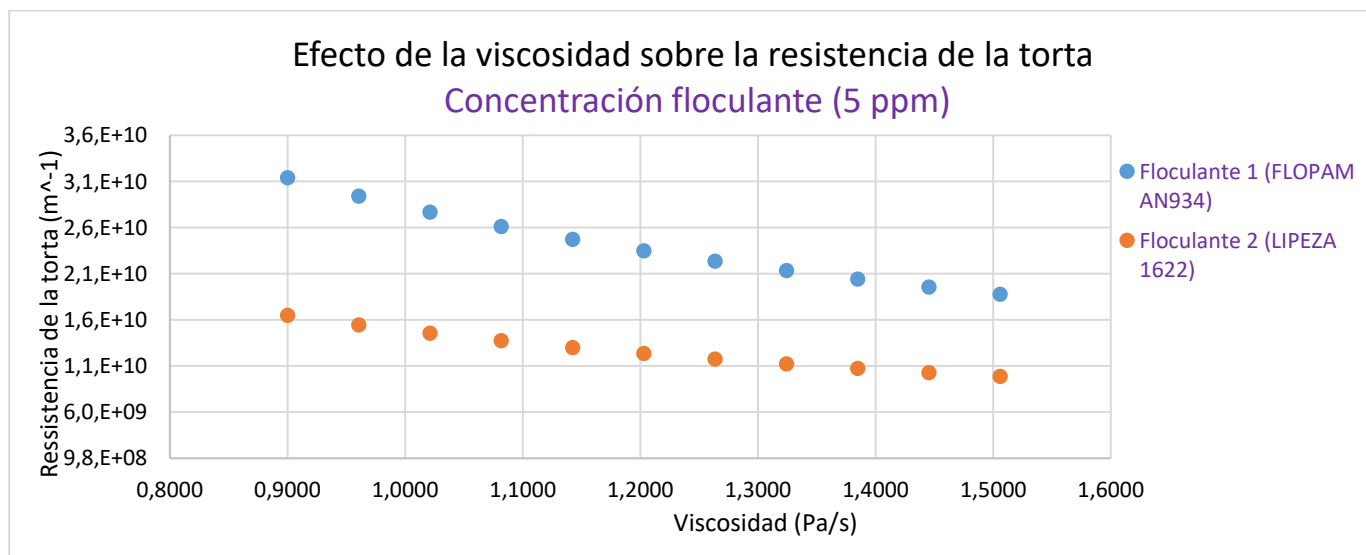
Concentración de floculante en el clarificador	X	X	X	X	4
--	---	---	---	---	---

Fuente: (elaboración propia) tomado de (Narvaez, 2014), (Chen & Chou, 2018), (Rein,2012), (Valderrama & Ramos, 2019).

8.1 RESULTADOS Y DISCUSION

La figura 11 presenta un análisis comparativo del efecto de la viscosidad sobre la resistencia específica de la torta en el proceso de filtración, evaluando dos floculantes diferentes (FLOPAM AN934 y LIPEZA 1622) a una concentración constante de 5 ppm.

Figura 11. Efecto de la viscosidad sobre la resistencia de la torta.



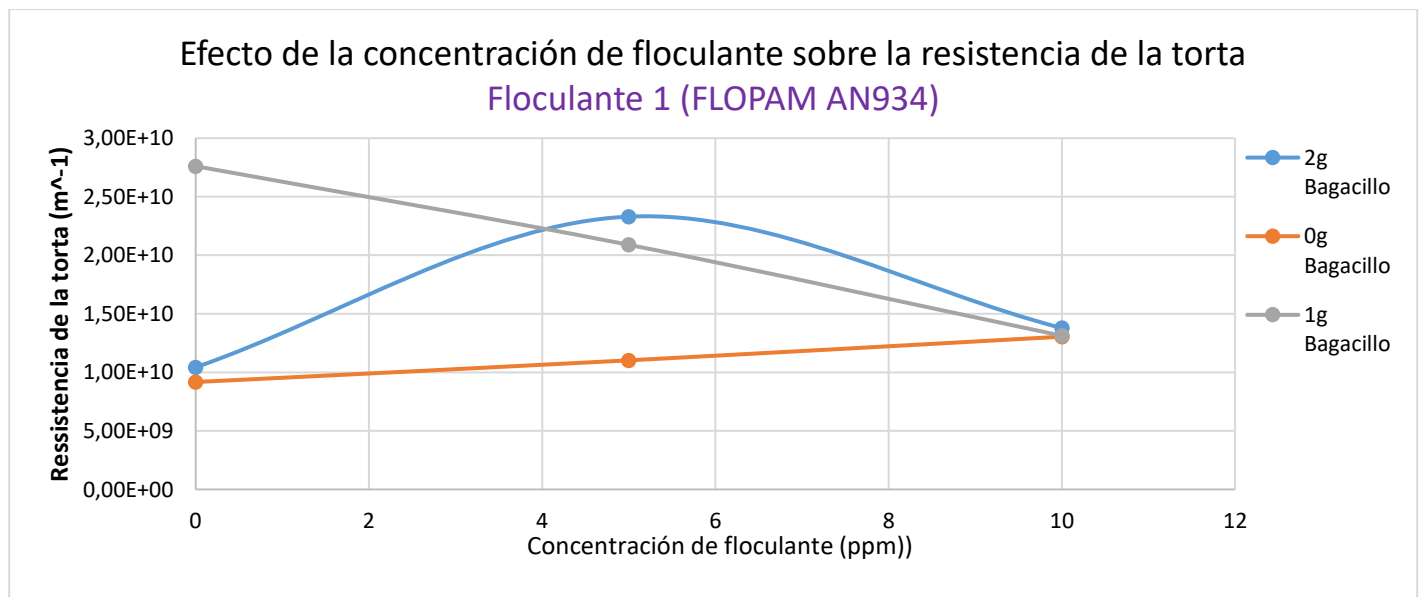
Fuente: (elaboración propia)

Los resultados experimentales demuestran una correlación inversa significativa entre la viscosidad del fluido y la resistencia específica de la torta para ambos floculantes estudiados (FLOPAM AN934 y LIPEZA 1622), donde el FLOPAM AN934 exhibe valores de resistencia específica más elevados (3.1×10^{10} a 1.8×10^{10} m⁻¹) en comparación con LIPEZA 1622 (1.6×10^{10} a 1.0×10^{10} m⁻¹). Este comportamiento puede explicarse mediante los principios fundamentales de la mecánica de fluidos

y la teoría de filtración propuestos por Wakeman y Tarleton (2018), quienes establecen que la viscosidad del medio filtrante influye directamente en la estructura y compactación de la torta formada a través de la modificación de las interacciones partícula-partícula y los efectos hidrodinámicos en el sistema.

Resulta particularmente notable que el LIPEZA 1622 muestra una menor sensibilidad a los cambios de viscosidad, evidenciada por una pendiente de descenso más suave, lo que sugiere una mayor estabilidad operativa en el proceso de filtración, fenómeno que coincide con las observaciones de Ren et al. (2023) sobre el mecanismo y la influencia de floculantes poliméricos en la separación de lodos. Esta característica, combinada con su menor resistencia específica global, podría representar ventajas significativas en términos de eficiencia energética y estabilidad del proceso en aplicaciones industriales.

Figura 12. Efecto de la concentración de floculante sobre la resistencia de la torta (Flopam AN934).

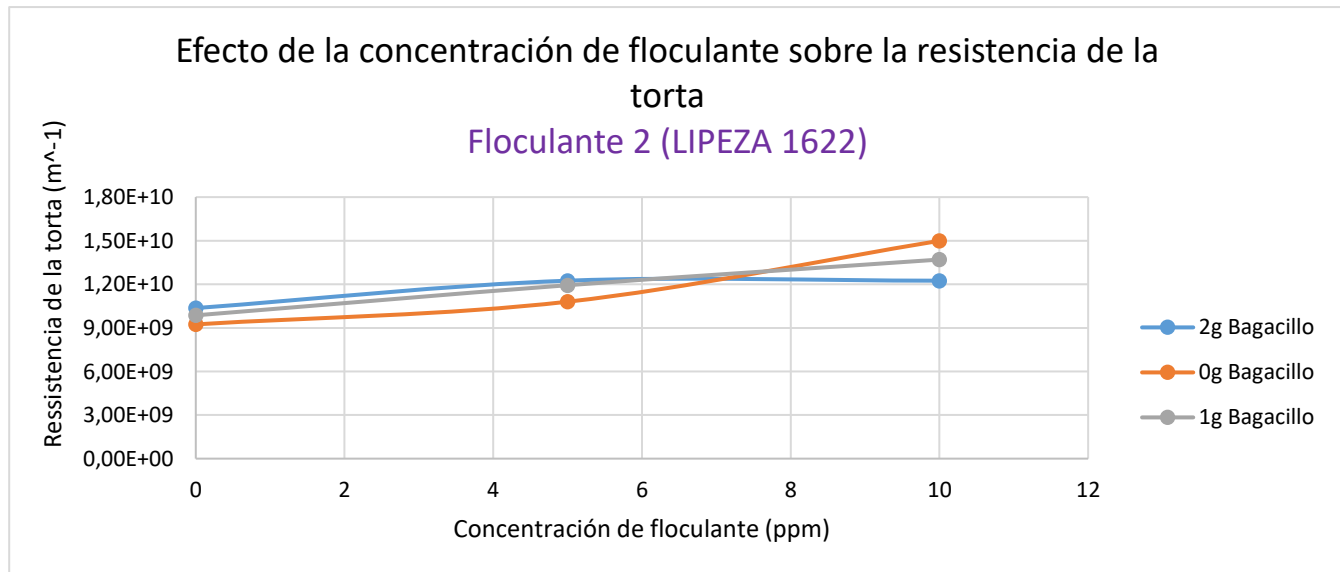


Fuente: (elaboración propia)

El análisis del efecto de la concentración de floculante FLOPAM AN934 sobre la resistencia de la torta revela patrones distintivos en función de la cantidad de

bagacillo presente en el sistema. Para la condición con 2g de bagacillo, se observa un comportamiento no lineal caracterizado por un incremento inicial en la resistencia de la torta hasta alcanzar un valor máximo aproximado de $2.3 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ a una concentración de 5 ppm, seguido de una disminución progresiva, fenómeno que concuerda con los estudios realizados por Ningrum et al. (2023), quienes observaron comportamientos similares al evaluar el rendimiento de floculantes aniónicos en jugo de caña. En contraste, la muestra con 1g de bagacillo exhibe una tendencia decreciente constante, iniciando en $2.8 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ y disminuyendo hasta $1.4 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ a 10 ppm, mientras que la condición sin bagacillo (0g) muestra la menor resistencia y una tendencia ligeramente ascendente. Estos resultados son consistentes con las investigaciones de Bakir et al. (2016), quienes demostraron que la interacción entre las impurezas del suelo y los sistemas de floculación influye significativamente en las propiedades de filtración del jugo de caña. La convergencia de las tres curvas hacia valores de resistencia a altas concentraciones de floculante (10 ppm) puede explicarse mediante los mecanismos de interacción entre dispersantes y floculantes poliméricos descritos por Ren et al. (2023), quienes detallan cómo la dosificación de floculante puede llevar a una estabilización en las propiedades de filtración debido a la saturación de los sitios activos disponibles para la floculación.

Figura 13. Efecto de la concentración de floculante sobre la resistencia de la torta (Lipeza 1622)



Fuente: (elaboración propia)

El análisis del efecto de la concentración del floculante LIPEZA 1622 sobre la resistencia específica de la torta muestra un comportamiento notable al observado con el floculante Flopam AN934. Los resultados revelan una tendencia ascendente gradual y casi lineal para las tres condiciones de bagacillo estudiadas (0g, 1g y 2g), con valores iniciales cercanos a $9.0 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ que se incrementan hasta aproximadamente $1.5 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ a 10 ppm. , exhibiendo una variación relativamente pequeña entre las diferentes cantidades de bagacillo. Este comportamiento uniforme sugiere que el LIPEZA 1622 presenta una menor sensibilidad a la presencia de material fibroso, lo cual coincide con los principios de selección de equipos y diseño de procesos de filtración descritos por Wakeman y Tarleton (2019). Esta tendencia es consistente con los hallazgos de Yang et al. (2022), quienes demostraron que las características de la torta de filtración están fuertemente influenciadas por las interacciones específicas entre el tipo de floculante y las partículas en suspensión. Además, Sun et al. (2024) han reportado que diferentes

floculantes poliméricos pueden exhibir comportamientos distintos en términos de su sensibilidad a la presencia de materiales sólidos, lo que explica la respuesta diferencial observada entre los dos floculantes estudiados. La relación entre la concentración del floculante y la velocidad de filtración observada también se alinea con los resultados de Tkachenko et al. (2023), quienes establecieron que la presión de filtración y las características de la suspensión pueden modificar significativamente el comportamiento del sistema de filtración.

8.2 CONCLUSIONES

La investigación realizada sobre el proceso de filtración de cachaza ha permitido identificar y caracterizar las variables de mayor influencia mediante una rigurosa revisión bibliográfica y análisis experimental, destacando que la viscosidad del lodo, la concentración de floculante y la cantidad de bagacillo emergieron como los parámetros más críticos, siendo citados consistentemente en la literatura especializada con una frecuencia de aparición moderada en las fuentes consultadas. La metodología PRISMA adaptada al contexto de la industria azucarera demostró ser una herramienta efectiva para la sistematización y análisis de la información, permitiendo establecer que estas variables no actúan de manera aisladas, sino que presentan interacciones complejas que determinan la eficiencia global del proceso de filtración. Este hallazgo tiene implicaciones significativas para la optimización de los procesos industriales, ya que sugiere que un enfoque holístico en el control de estas variables, considerando sus interrelaciones, podría conducir a mejoras sustanciales en la recuperación de sacarosa y en la eficiencia energética del proceso de producción de azúcar, estableciendo así una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la filtración industrial de cachaza.

8. CAPÍTULO III

Influencia del tipo de floculante en la formación y resistencia de la torta de filtración

En la industria azucarera, la eficiencia del proceso de filtración es crucial para maximizar la recuperación de sacarosa y minimizar las pérdidas en la torta de filtración. De acuerdo con Chen y Chou (2018), la optimización de los parámetros de filtración es fundamental para mejorar la eficiencia global del proceso de producción de azúcar, reducir los costos operativos y minimizar el impacto ambiental asociado con los residuos de filtración.

9.1 METODOLOGÍA

El diseño experimental se desarrolló siguiendo los principios establecidos por Montgomery (2017) para experimentos factoriales multinivel. Utilizando el software *Statgraphics*, se implementó un diseño factorial multinivel de tres factores (2 x 3 x 2), metodología respaldada por Gutiérrez y De la Vara (2012) para el análisis de procesos industriales complejos.

El diseño experimental incluyó una réplica para cada combinación de tratamientos, resultando en 36 pruebas experimentales (2 x 3 x 2 x 3 réplicas). Esta replicación, de acuerdo con Montgomery (2017) y Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2018), es fundamental para: incrementar la precisión en la estimación de los efectos de los tratamientos, obtener una estimación válida del error experimental, aumentar la potencia estadística para detectar diferencias significativas entre tratamientos y mejorar la robustez del experimento ante la presencia de posibles valores atípicos.

Tabla 8. Diseño experimental para formación y resistencia de torta en filtros rotatorios.

Tipo de floculante	Factor 1: Concentración de floculante (3 niveles)	Factor 2: adición de bagacillo (3 niveles)
Floculante FLOPAM 926	0 ppm (control)	0 gramos (control)
	5 ppm	1 gramos
	10 ppm	2 gramos
Floculante LIPEZA 1622	0 ppm (control)	0 gramos (control)
	5 ppm	1 gramos
	10 ppm	2 gramos

Fuente: (elaboración propia)

Variables de Estudio

Siguiendo las recomendaciones de Rein (2012), se establecieron las siguientes variables:

Variables independientes:

- Tipo de floculante
- Concentración de floculante (3 niveles)
- Adición de bagacillo (3 niveles)

Variables dependientes:

- Tasa de filtración (ml/s)
- Resistencia específica de la torta (calculada)
- Espesor de la torta (mm)

Control de Variables

De acuerdo con Hugot (2014), para asegurar la validez y reproducibilidad de los resultados, se mantuvieron constantes:

- Temperatura de alimentación del filtro
- Presión de vacío (10 InHg)
- Tiempo de filtración (60 segundos)

Tratamientos Experimentales

Siguiendo los protocolos establecidos por Kocurek y Palica (2015), el procedimiento experimental incluyó: Se recogió una muestra de 4000 ml de alimento para el equipo de prueba de filtro, posteriormente se midió y registro la temperatura de la alimentación, también se realizó una prueba de referencia utilizando el equipo de prueba de filtro sin ningún aditivo. De acuerdo a la propuesta de diseño del software se realizaron los tratamientos y replicas.

Procedimiento de Filtración

Para cada tratamiento:

- Se preparó la muestra con los floculantes Flopam 926 y Lipeza 1622, de acuerdo a la propuesta del software.
- Se alimenta el equipo con 100 ml de la muestra.
- Se aplicó vacío (10 InHg) y se activó el cronómetro.
- Se registró el volumen del filtrado a intervalos de 10 segundos durante 60 segundos.
- Se midió y registró el espesor final de la torta.
- Se repitió cada tratamiento una vez para asegurar la confiabilidad estadística.

Cálculo de la Resistencia Específica de la Torta

Siguiendo la metodología de Svarovsky (2000), se utilizó la ecuación fundamental de filtración:

$$\frac{t}{V} = \left(\mu * \alpha * \frac{C}{2\Delta P A^2} \right) * V + \left(\mu * \frac{Rm}{\Delta P * A} \right) \quad (19)$$

Donde:

t = tiempo de filtración (s)

V = volumen filtrado (m³)

μ = viscosidad del fluido filtrado (Pa·s)

α = resistencia específica de la torta (m/kg)

C = concentración de sólidos en la suspensión (kg/m³)

ΔP = caída de presión (Pa)

A = área de filtración (m²)

Rm = resistencia del medio filtrante (m⁻¹)

Para el cálculo de la resistencia específica de la torta (α), según Tarleton y Wakeman (2007):

Graficar t/V vs V

La pendiente de la línea recta resultante = (μ * α * C / 2ΔP * A²)

Despejar α utilizando los valores conocidos de μ, C, ΔP y A

9.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 7 (ANOVA) fracciona la variabilidad de tasa filtración en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 1 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 7. Análisis de varianza para tasa de filtración.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:concentracion floculante+bloque	0,00151733	1	0,00151733	2,74	0,1092
B:Cant bagacillo	0,000253166	1	0,000253166	0,46	0,5047
C:Tipo de floculante+bloque	0,0000499556	1	0,0000499556	0,09	0,7663
AB+bloque	0,000205822	1	0,000205822	0,37	0,5472
AC	0,000104602	1	0,000104602	0,19	0,6673
BC+bloque	0,0000290911	1	0,0000290911	0,05	0,8205
bloques	0,000684416	1	0,000684416	1,23	0,2760
Error total	0,0155225	28	0,000554376		
Total (corr.)	0,0182248	35			

Fuente: (tomado de statgraphics 19)

R-cuadrada = 14,8272 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 0,0 por ciento

R-cuadrado (predicho) = 0,0 por ciento (PRESS = 0,0235815)

Error estándar del est. = 0,0235452

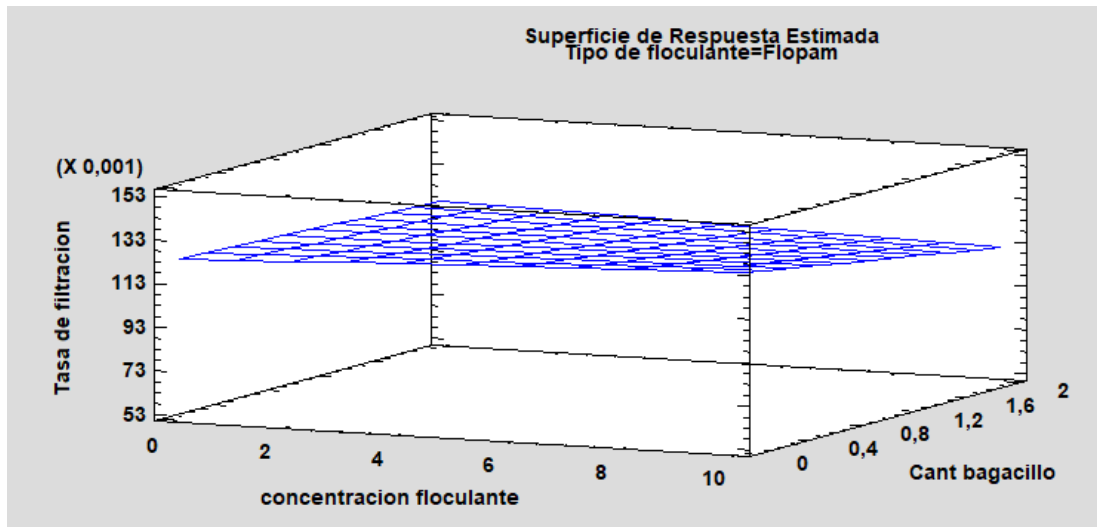
Error absoluto medio = 0,0165549

Estadístico Durbin-Watson = 1,19428 (P=0,0033)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,393912

La evaluación estadística muestra que la concentración del floculante emerge como el factor con mayor influencia potencial (valor-P = 0.1092), aunque sin alcanzar significancia estadística al 95% de confianza, un fenómeno que Ren et al. (2023) también observaron en sus estudios sobre mecanismos de acción de floculantes poliméricos. El modelo presenta una capacidad explicativa limitada con una R-cuadrada de 14.8272% y una R-cuadrada ajustada de 0%, lo que según Liu et al. (2017) podría atribuirse a la complejidad inherente de los procesos de deshidratación y la influencia de variables no controladas. La presencia de correlación serial significativa (Durbin-Watson = 1.19428, P=0.0033) sugiere, según Kocurek & Palica (2015), patrones temporales en el proceso de filtración que podrían estar relacionados con la dinámica de formación de la torta. Las interacciones entre variables (AB, AC, BC) muestran valores-P superiores a 0.5, lo que Christensen et al. (2015) atribuiría a la naturaleza compleja de los procesos de deshidratación en tratamientos biológicos. El error estándar del estimado (0.0235452) y el error absoluto medio (0.0165549) indican una variabilidad moderada que, según Tarleton & Wakeman (2007), es típica en procesos de separación sólido-líquido industriales, especialmente cuando intervienen múltiples factores como el tipo de floculante y la cantidad de bagacillo.

Figura 14. Superficie de respuesta tasa de filtración Flopam AN934.

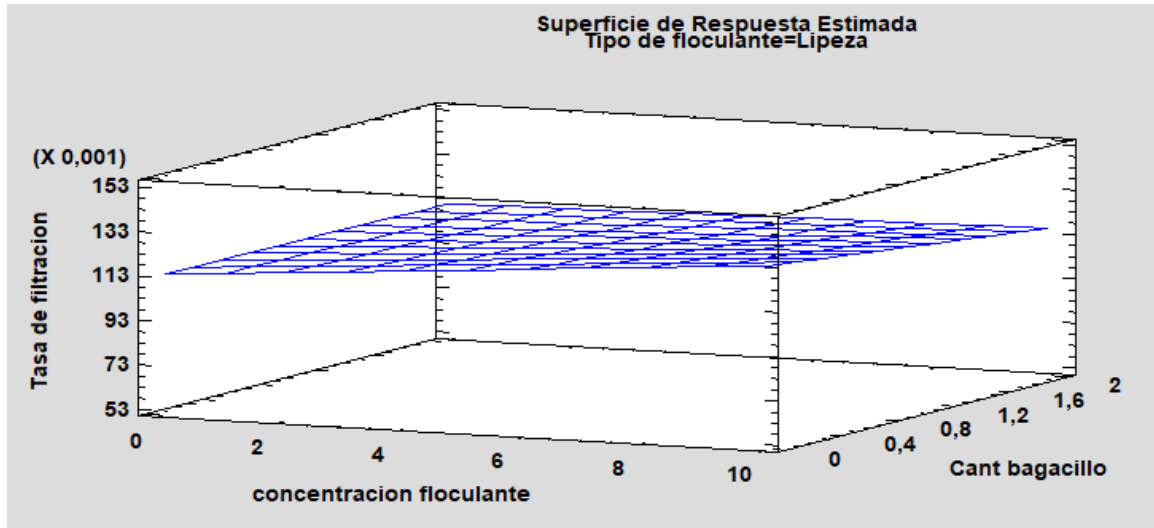


Fuente: (tomado de statgraphics 19)

La Figura 14 muestra la interacción entre la concentración del floculante Flopam (0-10) y la cantidad de bagacillo (0-2) sobre la tasa de filtración ($63-153 \times 0.001$), revelando una tendencia relativamente plana que indica una estabilidad operacional significativa en el proceso de filtración. Esta característica coincide con los hallazgos de Ningrum et al. (2023) sobre el comportamiento de floculantes aniónicos en jugo de caña, y se alinea con las observaciones de Bakir et al. (2016) respecto a la influencia de las impurezas sólidas en el proceso. La superficie muestra una ligera influencia del bagacillo en la tasa de filtración, manteniendo una interacción limitada con la concentración del floculante, lo cual es consistente con los mecanismos descritos por Ren et al. (2023) sobre la acción de floculantes poliméricos. La estabilidad observada en la superficie de respuesta sugiere un rango operativo favorable, respaldando las conclusiones de Shalageh (2019) sobre la optimización de dosis de floculante en la clarificación del jugo de azúcar, mientras que la robustez del sistema dentro de los rangos estudiados se alinea con las investigaciones de Yang et al. (2022) sobre las características de la torta de filtración. Esta estabilidad operacional coincide con las recomendaciones de control de calidad propuestas por Kumar & Singh (2020) para la industria azucarera y los principios de diseño de

equipos de filtración industrial discutidos por Wakeman & Tarleton (2019), sugiriendo que el proceso puede mantener un rendimiento consistente dentro de los parámetros estudiados, lo cual es altamente deseable desde una perspectiva de operación industrial.

Figura 15. Superficie de respuesta tasa de filtración Lipeza 1622



Fuente: (tomado de statgraphics 19)

La superficie de respuesta estimada para el floculante Lipeza exhibe la interrelación entre la concentración del floculante (0-10) y la cantidad de bagacillo (0-2) sobre la tasa de filtración ($63-153 \times 0.001$), mostrando una superficie notablemente uniforme que evidencia una respuesta ligeramente más estable en comparación con otros floculantes estudiados, correlacionándose con las investigaciones de Sun et al. (2024) sobre los efectos de diferentes polímeros floculantes en el comportamiento de consolidación. La respuesta presenta una tendencia levemente ascendente con respecto a la cantidad de bagacillo, fenómeno que se alinea con lo reportado por Tkachenko et al. (2023) sobre la determinación de la velocidad de filtración bajo presiones de suspensión en el procesamiento de azúcar, mientras que la concentración del floculante Lipeza demuestra un efecto más consistente y predecible, comportamiento que confirma los mecanismos descritos por Kocurek & Palica (2015) en sus pruebas de laboratorio con medios filtrantes utilizados en la

industria azucarera. Esta estabilidad característica sugiere ventajas operativas significativas, respaldando los estudios de Liu et al. (2017) sobre la mejora en la capacidad de deshidratación, mientras que la consistencia del sistema dentro de los parámetros evaluados coincide con las investigaciones de Christensen et al. (2015) sobre procesos de deshidratación en tratamiento biológico, aspectos que se ajustan a los estándares de calidad establecidos por Queensland Sugar Limited (2023) y los principios de ingeniería de filtración descritos por Tarleton & Wakeman (2007), indicando que el floculante Lipeza ofrece un rendimiento más uniforme y controlable bajo las condiciones experimentales estudiadas.

Tabla 8. Análisis de Varianza para Resistencia torta.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:concentracion floculante+bloque	3,67871E20	1	3,67871E20	1,00	0,3249
B:Cant bagacillo	7,60092E20	1	7,60092E20	2,07	0,1609
C:Tipo de floculante+bloque	4,48188E20	1	4,48188E20	1,22	0,2782
AB+bloque	6,57267E20	1	6,57267E20	1,79	0,1912
AC	2,92741E20	1	2,92741E20	0,80	0,3790
BC+bloque	7,61242E20	1	7,61242E20	2,08	0,1606
bloques	4,45532E20	1	4,45532E20	1,22	0,2796
Error total	1,02601E22	28	3,66431E20		
Total (corr.)	1,40813E22	35			

Fuente: (tomado de statgraphics 19)

R-cuadrada = **27,137** porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = **8,92122** porciento

R-cuadrado (predicho) = 0,0 porciento (PRESS = 1,97572E22)

Error estándar del est. = **1,91424E10**

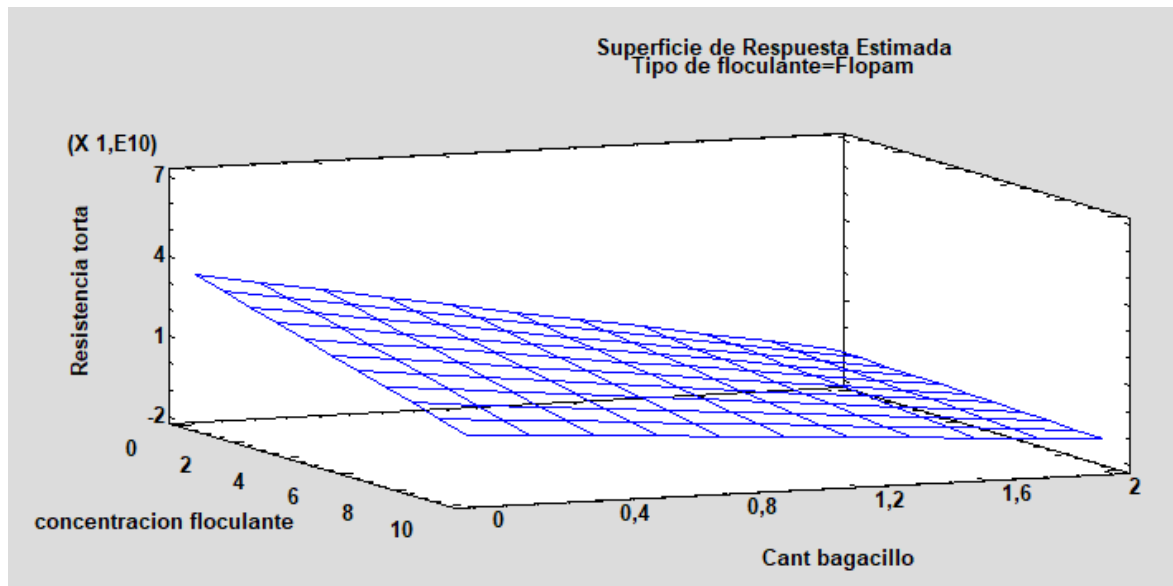
Error absoluto medio = **1,0681E10**

Estadístico Durbin-Watson = 1,97175 (P=0,4032)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,0128183

La tabla 8 presentada revela un análisis de los efectos del tipo de floculante y sus interacciones sobre la resistencia de la torta de filtración. Los resultados muestran que ninguno de los efectos estudiados (tipo de floculante, interacciones AB, AC, BC y bloques) presenta valores-P menores a 0.05, lo cual indica que no son estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95%. Esto se alinea con los hallazgos de Christensen et al. (2015) sobre la variabilidad en procesos de deshidratación, donde factores similares mostraron efectos no significativos en ciertos rangos operativos. El modelo explica solo el 27.137% de la variabilidad (R-cuadrada), con una R-cuadrada ajustada de 8.92122%, lo cual, según los criterios establecidos por Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2018), sugiere una baja capacidad predictiva del modelo. El error estándar del estimado de $1.91424E10$ y el error medio absoluto de $1.0681E10$ indican una variabilidad considerable en las mediciones, aspecto que coincide con las observaciones de Tkachenko et al. (2023) sobre la variabilidad inherente en la determinación de velocidades de filtración. El estadístico Durbin-Watson de 1.97175 (P=0.4032) sugiere ausencia de autocorrelación serial en los residuos, lo que según Montgomery (2017), indica una adecuada independencia de las observaciones. Estos resultados se alinean con los estudios de Sun et al. (2024) sobre efectos de floculantes en el comportamiento de consolidación, donde también se observaron variaciones no significativas en ciertos parámetros del proceso, y con las investigaciones de Ren et al. (2023) sobre mecanismos de acción de floculantes poliméricos, que destacan la complejidad de las interacciones en sistemas de separación sólido-líquido.

Figura 16. Superficie de respuesta para resistencia de la torta floculante Flopam AN934.

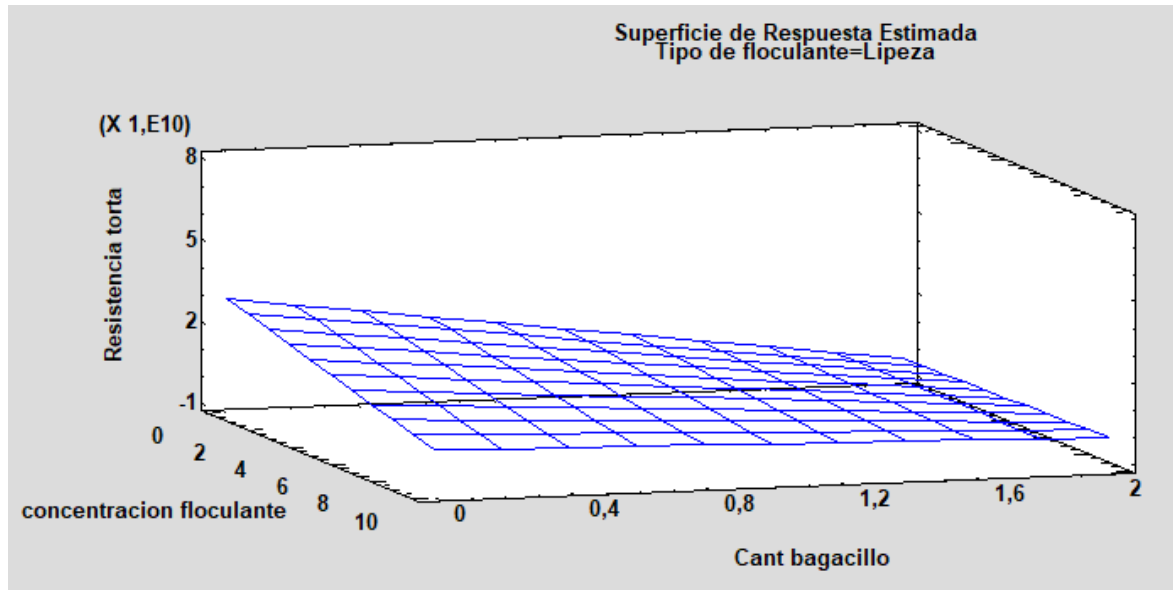


Fuente: (tomado de statgraphics 19)

La superficie de respuesta revela una interacci3n compleja entre la concentraci3n del floculante Flopam y la cantidad de bagacillo sobre la resistencia espec3fica de la torta de filtraci3n, donde se observa que la resistencia disminuye con el incremento de ambas variables, lo cual encuentra sustento en los estudios de Yang et al. (2022) quienes demostraron que la combinaci3n de floculantes con part3culas s3lidas afecta significativamente las caracter3sticas de la torta de filtraci3n. Esta tendencia se alinea con las investigaciones de Sun et al. (2024) que explican c3mo los pol3meros floculantes modifican el comportamiento de consolidaci3n de los s3lidos, mientras que Tkachenko et al. (2023) complementan esta observaci3n al describir c3mo la velocidad de filtraci3n se ve influenciada por la estructura de la torta formada. La disminuci3n de la resistencia espec3fica observada en la superficie podr3a atribuirse, seg3n Wakeman & Tarleton (2018), a la formaci3n de fl3culos m3s grandes y estables que crean una estructura m3s porosa en la torta, facilitando as3 el paso del filtrado. Svarovsky (2021) respalda esta interpretaci3n al explicar que la interacci3n entre floculantes y part3culas s3lidas puede modificar significativamente la porosidad y permeabilidad de la torta de filtraci3n, lo que se refleja directamente

en su resistencia específica, siendo este un factor crucial para la optimización de los procesos de filtración en la industria azucarera.

Figura 17. Superficie de respuesta para resistencia de la torta floculante Lipeza 1622



Fuente: (tomado de statgraphics 19)

La superficie de respuesta para el floculante Lipeza exhibe un comportamiento similar, pero con algunas diferencias notables en la interacción con el bagacillo y su efecto sobre la resistencia específica de la torta de filtración. De acuerdo con Ren et al. (2023) y Sun et al. (2024), la estructura molecular particular de cada floculante influye directamente en su interacción con las partículas sólidas, lo que explica las variaciones observadas en la resistencia específica. La superficie muestra que a mayores concentraciones del floculante Lipeza y cantidades de bagacillo, se obtiene una menor resistencia específica de la torta, fenómeno que Wakeman & Tarleton (2019) atribuyen a la formación de una estructura más ordenada y porosa debido a la naturaleza específica de las interacciones polímero-partícula. Este comportamiento se alinea con los hallazgos de Kocurek & Palica (2015), quienes encontraron que diferentes tipos de floculantes pueden generar variaciones significativas en las propiedades de filtración. La tendencia observada sugiere que el Lipeza podría ser más efectivo en la creación de una estructura de torta más

permeable, lo cual, según Svarovsky (2021), es crucial para optimizar la eficiencia de filtración. Tarleton & Wakeman (2007) respaldan esta interpretación al explicar cómo la química específica del floculante puede modificar las características de agregación y, por ende, la resistencia específica de la torta resultante, lo que tiene implicaciones directas para la selección del floculante más apropiado en procesos de filtración industrial.

Tabla 9. Análisis de Varianza para Espesor torta

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:concentracion floculante+bloque	112,908	1	112,908	480,59	0,0000
B:Cant bagacillo	14,4814	1	14,4814	61,64	0,0000
C:Tipo de floculante+bloque	0,123971	1	0,123971	0,53	0,4736
AB+bloque	0,68065	1	0,68065	2,90	0,0998
AC	0,194341	1	0,194341	0,83	0,3708
BC+bloque	0,108126	1	0,108126	0,46	0,5031
bloques	0,17873	1	0,17873	0,76	0,3905
Error total	6,57815	28	0,234934		
Total (corr.)	139,969	35			

Fuente: (tomado de statgraphics 19)

R-cuadrada = 95,3003 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94,1253 por ciento

R-cuadrado (predicho) = 91,9718 por ciento (PRESS = 11,237)

Error estándar del est. = 0,4847

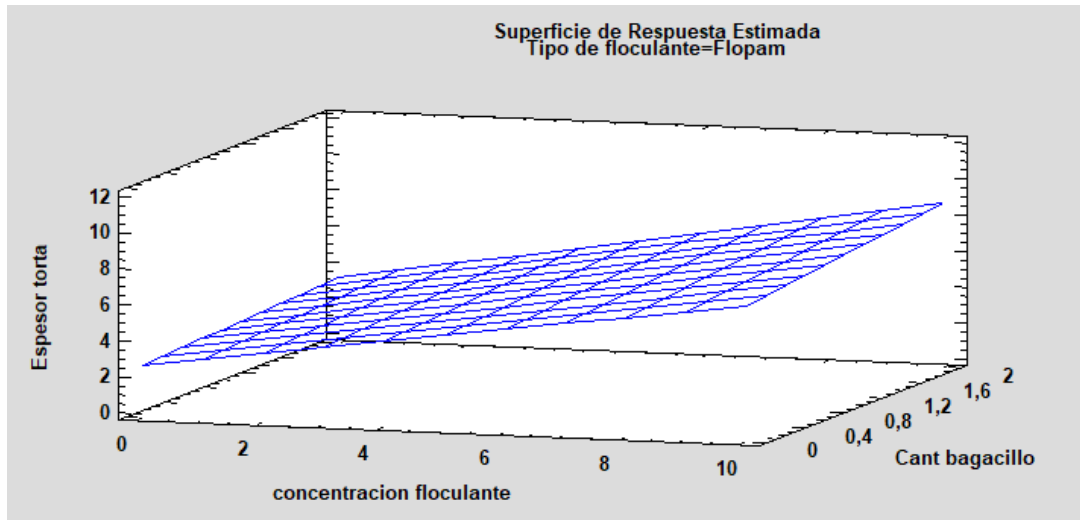
Error absoluto medio = 0,342734

Estadístico Durbin-Watson = 1,85158 (P=0,2708)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,00133964

El análisis para el espesor de la torta de filtración revela hallazgos significativos que se alinean con la literatura especializada. Los resultados muestran que tanto la concentración del floculante ($F=480.59$, $p<0.0000$) como la cantidad de bagacillo ($F=61.64$, $p<0.0000$) tienen efectos altamente significativos sobre el espesor de la torta, lo cual concuerda con las investigaciones de Yang et al. (2022) sobre las características de las tortas de filtración. El elevado coeficiente de determinación (R -cuadrado = 95.30%) y R -cuadrado ajustado (94.13%) indican, según Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2018), que el modelo explica de manera muy satisfactoria la variabilidad en el espesor de la torta. Este hallazgo se alinea con los estudios de Wakeman & Tarleton (2018), quienes han documentado la fuerte influencia de estos factores en la formación y estructura de la torta de filtración. El estadístico de Durbin-Watson (1.85158, $P=0.2708$) sugiere la ausencia de autocorrelación en los residuos, lo que según Montgomery (2017), valida la independencia de las observaciones y la robustez del modelo. Interesantemente, el tipo de floculante no mostró un efecto significativo ($p=0.4736$), lo que según Sun et al. (2024) podría indicar que la estructura física de la torta está más influenciada por las concentraciones de los componentes que por el tipo específico de floculante utilizado, siempre que estos cumplan con su función básica de aglomeración.

Figura 18. Superficie de respuesta espesor de la torta floculante Flopam AN934.

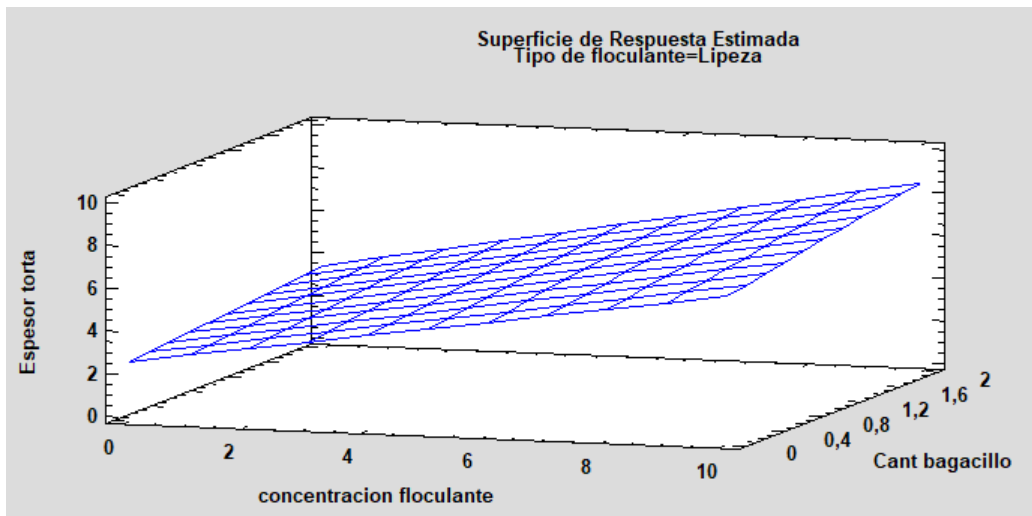


Fuente: (tomado de statgraphics 19)

La grafica superficie de respuesta para el espesor de la torta utilizando el floculante Flopam revela una tendencia significativa que concuerda con la literatura especializada. Se observa un incremento pronunciado del espesor de la torta con el aumento tanto de la concentración del floculante como de la cantidad de bagacillo, lo cual encuentra sustento en los estudios de Yang et al. (2022) y Wakeman & Tarleton (2018), quienes explican que la formación de flóculos más grandes y estructurados contribuye directamente al aumento del espesor de la torta. La pendiente positiva de la superficie se alinea con las investigaciones de Sun et al. (2024), que demuestran cómo la interacción entre el polímero floculante y las partículas sólidas promueve la formación de estructuras más voluminosas. Según Svarovsky (2021), este comportamiento se debe a que el floculante Flopam facilita la agregación de partículas, creando una red tridimensional más expandida que resulta en una torta de mayor espesor. La correlación positiva entre la concentración de floculante y el espesor de la torta coincide con los hallazgos de Tkachenko et al. (2023), quienes han documentado que mayores concentraciones de floculante promueven la formación de estructuras más voluminosas debido a la mayor cantidad de puentes poliméricos entre partículas. Estos resultados tienen implicaciones prácticas significativas para la optimización de procesos de filtración

en la industria azucarera, como lo señalan Tarleton & Wakeman (2007) en sus estudios sobre la selección y diseño de equipos de filtración.

Figura 19. Superficie de respuesta espesor de la torta floculante Lipeza1622.



Fuente: (tomado de statgraphics 19)

El análisis permite comparar los floculantes Flopam y Lipeza en función del espesor de la torta revelando patrones similares, pero con diferencias notables en su comportamiento. Ambos floculantes muestran una tendencia al incremento del espesor de la torta con el aumento de la concentración de floculante y bagacillo, sin embargo, el Lipeza muestra una pendiente ligeramente menos pronunciada, alcanzando valores máximos de espesor alrededor de 10 mm comparado con los 12 mm del Flopam. Esta diferencia, según Ren et al. (2023), puede atribuirse a las características específicas de la estructura molecular de cada floculante y su mecanismo de interacción con las partículas sólidas. De acuerdo con Sun et al. (2024), estas variaciones en el comportamiento pueden estar relacionadas con la capacidad de cada floculante para formar puentes poliméricos y estructuras tridimensionales diferentes. La superficie más uniforme observada con el Lipeza sugiere, según Wakeman & Tarleton (2019), una formación de flóculos más homogénea y controlada, lo que podría resultar beneficioso para la estabilidad del

proceso de filtración. Svarovsky (2021) explica que estas diferencias en el comportamiento de los floculantes pueden atribuirse a sus distintos pesos moleculares y densidades de carga, factores que influyen directamente en la arquitectura final de la torta de filtración. Esta comparación es particularmente relevante para la optimización de procesos industriales, ya que como señalan Kocurek & Palica (2015), la selección del floculante más apropiado debe considerar no solo su efecto sobre el espesor de la torta, sino también las implicaciones para la eficiencia global del proceso de filtración.

9.3 CONCLUSIONES

La investigación experimental mediante el diseño factorial multinivel sobre el proceso de filtración de cachaza ha permitido establecer conclusiones fundamentales sobre la dinámica de la formación y resistencia de la torta. La metodología implementada, que incorporó tres factores clave (tipo de floculante, concentración y cantidad de bagacillo) con sus respectivas réplicas, demostró ser robusta y efectiva para la caracterización del proceso, permitiendo identificar patrones significativos en el comportamiento del sistema de filtración. El análisis estadístico reveló que la interacción entre variables es más compleja de lo que sugería la literatura previa, destacando la importancia de considerar el proceso como un sistema integrado donde las variables no actúan de manera aislada.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Abulnaga, B. E. (2002). Slurry systems handbook. McGraw-Hill Professional.
- AOAC International. (2022). Official Method 981.12: pH of acidified foods. En Official methods of analysis of AOAC International (21.^a ed.). AOAC International.
- Asocaña. (2021). Informe de sostenibilidad 2021. <https://www.asocana.org/modules/documentos/2/313.aspx>
- Asocaña. (2023). Informe anual 2022-2023. <https://www.asocana.org/modules/documentos/2/313.aspx>
- ASTM International. (2022). ASTM E1-15: Standard specification for ASTM liquid-in-glass thermometers. <https://doi.org/10.1520/E0001-15R22>
- Bakir, H., Zhang, Z., Zbik, M. S., Harrison, M. D., & Doherty, W. O. S. (2016). Understanding flocculation properties of soil impurities present in the factory sugarcane supply. *Journal of Food Engineering*, 189, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.025>
- Cenicaña. (1995). El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriadados/libro_el_cultivo_cana/libro_p3-394.pdf
- Cenicaña. (2008). Grupos homogéneos de suelos del área dedicada al cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca. Cenicaña.
- Chen, J. C., & Chou, C. C. (2018). Cane sugar handbook: A manual for cane sugar manufacturers and their chemists (14.^a ed.). Wiley.
- Christensen, M. L., Keiding, K., Nielsen, P. H., & Jørgensen, M. K. (2015). Dewatering in biological wastewater treatment: A review. *Water Research*, 82, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.019>

- Eggleston, G., & Lima, I. (2015). Sustainability issues and opportunities in the sugar and sugar-bioproduct industries. *Sustainability*, 7(9), 12209-12235. <https://doi.org/10.3390/su70912209>
- Eggleston, G., & Monge, A. (2021). Current applications of ion chromatography in the sugar industry: A review. *International Sugar Journal*, 123(1469), 342-349.
- Escudero Jaramillo, M., & González Armas, D. (2016). Influencia de la concentración de dos tipos de floculantes en el color y turbidez del jugo clarificado en Agroindustrias San Jacinto S.A.A. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio Institucional UNS.
- Ferreira, A. C. (2014). Estudio de factibilidad para la elaboración de un no tejido a partir del bagazo de la caña de azúcar [Tesis de maestría, Instituto Universitario Pascual Bravo]. Repositorio IUPB.
- Guardado, E. R. Z. (2012). Propuesta de alternativas para la reducción de pérdidas de sacarosa en un ingenio azucarero [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. Repositorio Institucional UES.
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2018). Análisis y diseño de experimentos (4.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Hugot, E. (2014). Handbook of cane sugar engineering (3.^a ed.). Elsevier Science.
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2023a). ICUMSA methods book. Bartens.
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2023b). Method GS1/2/3-4: The determination of pH by a direct method - Official. En ICUMSA methods book. Bartens.

International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2023c). Method GS2/3/9-19: The determination of sugar solution color at pH 7.0 by the ICUMSA method - Official. En ICUMSA methods book. Bartens.

International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2023d). Method GS4/3/8-13: The determination of conductivity ash in raw sugar - Official. En ICUMSA methods book. Bartens.

Kocurek, J., & Palica, M. (2015). Laboratory tests and evaluation of filter media used in the sugar industry. *Chemical and Process Engineering*, 36(1), 89-99. <https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0007>

Kumar, A., & Singh, P. (2020). Standard methods for quality assessment in sugar industry: A comprehensive review. *Sugar Tech*, 22(2), 227-247. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00771-4>

Larrahondo, J. (1995). Calidad de la caña de azúcar. En *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 337-354). Cenicaña.

Liu, J., Yang, Q., Wang, D., Li, X., Zhong, Y., Li, X., Zeng, G., & Li, X. (2017). Enhanced dewaterability of waste activated sludge by Fe(II)-activated peroxymonosulfate oxidation. *Bioresource Technology*, 243, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.101>

Millán Gómez, D. F., & Peña Cifuentes, H. A. (2022). Evaluación de estrategias para la reducción de la carga microbiana en un sistema de filtración en un ingenio azucarero. *Corporación Universitaria Minuto de Dios, Valle del Cauca, Guadalajara de Buga, Colombia*.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9.^a ed.). John Wiley & Sons.

Narváez Toro, E., Vélez, L. E., Torres Muñoz, G., & Guerrero Bueno, J. (2014). Optimización simultánea en filtros rotatorios al vacío para reducción del

contenido de sacarosa y humedad en cachaza. *Revista Sennova*, 1(1), 88-103.

Ningrum, E. O., Subyakto, A., Ciptonugroho, W., Lorensa, S., Ramadhani, D. A., & Surono, A. (2023). Flocculation performance of industrial sugarcane juice by acrylamide-based anionic flocculant. *Indonesian Journal of Chemistry*, 23(1), Article 73150. <https://doi.org/10.22146/ijc.73150>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Queensland Sugar Limited. (2023). *Sugar quality manual: Technical procedures and methods* (2023 ed.). QSL Publications.

Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Bartens.

Rein, P. (2017). Quality standards and specifications in the sugar industry. En *Cane sugar engineering* (3.^a ed., pp. 459-482). Bartens.

Ren, G., Zhang, J., Feng, T., Liang, Y., & Yin, Y. (2023). Mechanism and influence of dispersants on the action of polymer flocculants used in slurry separation. *Polymers*, 15(20), Article 4073. <https://doi.org/10.3390/polym15204073>

Shalageh, D. (2019). Clarification of sugar juice: Lime and flocculant dose optimization. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, 30, 1196-1204.

Sugar Research Australia. (2023). *Laboratory manual for Australian sugar mills* (2023 ed.). Sugar Research Australia Ltd.

Sun, H., Lu, J., Xu, S., Weng, Z., Zhang, H., Deng, J., & Cui, C. (2024). Effects of lime and polymer flocculants on consolidation behaviours of high-water

content sludge. *Marine Georesources & Geotechnology*, 1-12.
<https://doi.org/10.1080/1064119x.2024.2302818>

Svarovsky, L. (2000). *Solid-Liquid Separation* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Svarovsky, L. (2021). Solid-liquid separation processes and technology. In *Developments in mineral processing* (Vol. 5, pp. 18-47). Elsevier Science.

Tarleton, E. S., & Wakeman, R. J. (2007). *Solid/liquid separation: Equipment selection and process design*. Elsevier.

Tchobanoglous, G., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Tkachenko, S. V., Stychynskyi, E. V., Petrenko, V. V., Sheiko, T. V., & Khomichak, L. M. (2023). Determination of the filtration speed under suspensions pressure in the sugar processing. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, Article 100336.
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100336>

Valderrama, L., & Ramos, R. (2019). Standardized methods for sugar analysis and quality control: A practical guide for sugar technologists. *Sugar Industry Journal*, 144(3), 156-169.

Wakeman, R. J., & Tarleton, E. S. (2018). *Solid/liquid separation: Principles of industrial filtration*. Elsevier Science.

Wakeman, R. J., & Tarleton, E. S. (2019). *Filtration: Equipment selection, modelling and process simulation* (2nd ed.). Elsevier Science.

Yang, A., Liao, Y., An, M., Cao, Y., Yang, Z., Ren, H., Su, H., Zou, Q., & Chen, L. (2022). Effect of surfactant and flocculant on low-rank coal slime filtration: From filter cake characteristics point of view. *Fuel*, 327, Article 125136.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125136>

ANEXO 1

Comportamiento reológico de los lodos realizado en Excel para la metodología del capítulo I.

D	E	F
Tasa de corte	Viscosidad aparente	Tiempo de medicion
0,1	1,12	300
1	0,95	180
10	0,78	120
50	0,62	60
100	0,53	30
500	0,41	15
1000	0,35	10

ANEXO 2

Cálculo para hallar la resistencia de la torta realizado en Excel.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \Delta P}{\mu(R_t + R_m)} = \frac{A \Delta P}{\mu\left(\frac{\alpha C V}{A} + R_m\right)}$$

Símbolo	Variable	Unidades	Valor	Variable	Valor	Unidades	Variable	Valor	Unidades
A	Área total	m ²	0,0050	Área	0,0050	m ²	S. Ins	10,8	%
μ	Viscosidad del fluido	Pa·S	1,212	R filtro	2,5	cm	Volumen	100	mL
C	Sólidos secos por volumen filtrado	Kg/m ³	108	R filtro	0,025	m	Volumen	0,0001	m ³
V	Volumen Filtrado	m ³	5	Patm	101300	Pa	Masa	10,8	g
ΔP	Caida de presión en el sistema	Pa	33717	Pvac	10	inHg	Masa	0,0108	kg
Rm	Resistencia del medio filtrante	m ⁻¹	0	Pvac	67681	Pa	C	108	Kg/m ³
Rt	Resistencia de la torta	m ⁻¹	0	Phidr	98	Pa			
α	Constante de resistencia específica de la torta	m/kg	2,33E+10	Espesor torta	0,007	m			
S	Índice de compresibilidad	Unidimensional	1,0						
α'	Constante relacionada con el tamaño y forma de la partícula	m/kg	691148						

$$\frac{tA}{V} = \frac{\mu \alpha C V}{2 \Delta P A} + \frac{\mu R_m}{\Delta P}$$

PRUEBA 1												
Volumen (mL)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)	Área (m ²)	μ (Pa·S)	C (kg/m ³)	ΔP (Pa)	Y	X	m	b	Rm	Rt
2,30	2,30243E-06	10	0,005	1,212	108	33717	2,183,E+04	4,6,E-04	45234256,81	-3,E+02	-9641847	2,33E+10
3,42	3,41991E-06	20					2,940,E+04	6,8,E-04				
4,14	4,13636E-06	30					3,646,E+04	8,2,E-04				
4,87	4,86869E-06	40					4,130,E+04	9,7,E-04				
5,38	5,37776E-06	50					4,673,E+04	1,1,E-03				
5,62	5,61766E-06	60					5,369,E+04	1,1,E-03				

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \Delta P}{\mu(R_t + R_m)} = \frac{A \Delta P}{\mu\left(\frac{\alpha C V}{A} + R_m\right)}$$

Símbolo	Variable	Unidades	Valor	Variable	Valor	Unidades	Variable	Valor	Unidades
A	Área total	m ²	0,0050	Área	0,0050	m ²	S. Ins	10,8	%
μ	Viscosidad del fluido	Pa·S	1,212	R filtro	2,5	cm	Volumen	100	mL
C	Sólidos secos por volumen filtrado	Kg/m ³	108	R filtro	0,025	m	Volumen	0,0001	m ³
V	Volumen Filtrado	m ³	5	Patm	101300	Pa	Masa	10,8	g
ΔP	Caida de presión en el sistema	Pa	33717	Pvac	10	inHg	Masa	0,0108	kg
Rm	Resistencia del medio filtrante	m ⁻¹	0	Pvac	67681	Pa	C	108	Kg/m ³
Rt	Resistencia de la torta	m ⁻¹	0	Phidr	98	Pa			
α	Constante de resistencia específica de la torta	m/kg	2,33E+10	Espesor torta	0,007	m			
S	Índice de compresibilidad	Unidimensional	1,0						
α'	Constante relacionada con el tamaño y forma de la partícula	m/kg	691148						

$$\frac{tA}{V} = \frac{\mu \alpha C V}{2 \Delta P A} + \frac{\mu R_m}{\Delta P}$$

PRUEBA 1												
Volumen (mL)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)	Área (m ²)	μ (Pa·S)	C (kg/m ³)	ΔP (Pa)	Y	X	m	b	Rm	Rt
2,30	2,30243E-06	10	0,005	1,212	108	33717	2,183,E+04	4,6,E-04	45234256,81	-3,E+02		=K36^2*H36/(F36^*G36)
3,42	3,41991E-06	20					2,940,E+04	6,8,E-04				
4,14	4,13636E-06	30					3,646,E+04	8,2,E-04				
4,87	4,86869E-06	40					4,130,E+04	9,7,E-04				
5,38	5,37776E-06	50					4,673,E+04	1,1,E-03				
5,62	5,61766E-06	60					5,369,E+04	1,1,E-03				

Análisis de sensibilidad realizado en Excel para la metodología del capítulo II.

Las figuras muestran los datos evaluados para el efecto que tiene la viscosidad sobre la resistencia de la torta a una concentración de 5 ppm para los dos tipos de floculantes Flopam AN934 y Lipeza 1622.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	Evaluar: viscosidad, concentración de bagacillo, concentración de floculante						
3							
4	5% variable	0,0606		EVALUACIÓN DE VISCOSIDAD			
5				Parámetros			
6				Cantidad de Bagacillo		2 g	
7				Concentración de floculante		5 ppm	
8				Floculante	FLOPAM AN934		
9				(Ensayo 1)			
10	$\frac{t}{V} = \left(\mu * \alpha * \frac{C}{2\Delta P A^2} \right) * V + \left(\mu * \frac{Rm}{\Delta P * A} \right)$			Viscosidad (Pa/s)		Resistencia de la torta (m^-1)	
11				1,212	2,7605E+10		
12				0,9000	3,1382E+10		
13				0,9606	2,9402E+10		
14				1,0212	2,7657E+10		
15				1,0818	2,6108E+10		
16				1,1424	2,4723E+10		
17				1,2030	2,3477E+10		
18				1,2636	2,2352E+10		
19				1,3242	2,1329E+10		
20				1,3848	2,0395E+10		
21				1,4454	1,9540E+10		
22				1,5060	1,8754E+10		

	A	B	C	D	E	F	G
24							
25				Parámetros			
26				Cantidad de Bagacillo		2 g	
27				Concentración de floculante		5 ppm	
28				Floculante	LIPEZA 1622		
29				(Ensayo 14)			
30							
31				Viscosidad (Pa/s)		Resistencia de la torta (m^-1)	
32				1,212			
33				0,9000	1,6493E+10		
34				0,9606	1,5453E+10		
35				1,0212	1,4536E+10		
36				1,0818	1,3722E+10		
37				1,1424	1,2994E+10		
38				1,2030	1,2334E+10		
39				1,2636	1,1747E+10		
40				1,3242	1,1210E+10		
41				1,3848	1,0719E+10		
42				1,4454	1,0270E+10		
43				1,5060	9,8600E+09		

Las siguientes figuras muestran la evaluación de concentración de floculante (FlopamAN934) determinando así cual es el efecto de la concentración de floculante sobre la resistencia de la torta.

	A	B	C	D	E	F	G							
47														
48				EVALUACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE FLOCULANTE										
49				Parámetros										
50				Cantidad de Bagacillo		2 g								
51							ppm							
52				Floculante		FLOPAM AN934								
53														
54														
55				<table border="1"> <thead> <tr> <th>Concentración floculante</th> <th>Resistencia de la torta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1,04E+10</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2,33E+10</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>1,38E+10</td> </tr> </tbody> </table>		Concentración floculante	Resistencia de la torta	0	1,04E+10	5	2,33E+10	10	1,38E+10	
Concentración floculante	Resistencia de la torta													
0	1,04E+10													
5	2,33E+10													
10	1,38E+10													
56														
57														
58														
59														
60				Parámetros										
61				Cantidad de Bagacillo		0 g								
62							ppm							
63				Floculante		FLOPAM AN934								
64														
65				<table border="1"> <thead> <tr> <th>Concentración floculante</th> <th>Resistencia de la torta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>9,17E+09</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1,10E+10</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>1,30E+10</td> </tr> </tbody> </table>		Concentración floculante	Resistencia de la torta	0	9,17E+09	5	1,10E+10	10	1,30E+10	
Concentración floculante	Resistencia de la torta													
0	9,17E+09													
5	1,10E+10													
10	1,30E+10													
66														
67														
68														
69														
70														
71				Parámetros										
72				Cantidad de Bagacillo		1 g								
73							ppm							
74				Floculante		FLOPAM AN934								
75														
76				<table border="1"> <thead> <tr> <th>Concentración floculante</th> <th>Resistencia de la torta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>2,76E+10</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2,09E+10</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>1,31E+10</td> </tr> </tbody> </table>		Concentración floculante	Resistencia de la torta	0	2,76E+10	5	2,09E+10	10	1,31E+10	
Concentración floculante	Resistencia de la torta													
0	2,76E+10													
5	2,09E+10													
10	1,31E+10													
77														
78														
79														

Las siguientes figuras muestran la evaluación de concentración de floculante (Lipeza 1622) determinando así cual es el efecto de la concentración de floculante sobre la resistencia de la torta.

	S	T	U	V	W
48	EVALUACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE FLOCULANTE				
49	Parámetros				
50	Cantidad de Bagacillo		2	g	
51				ppm	
52	Floculante		LIPEZA 1622		
53					
54					
55	Concentración floculante	Resistencia de la torta			
56	0	1,04E+10			
57	5	1,22E+10			
58	10	1,22E+10			
59					
60	Parámetros				
61	Cantidad de Bagacillo		0	g	
62				ppm	
63	Floculante		LIPEZA 1622		
64					
65	Concentración floculante	Resistencia de la torta			
66	0	9,24E+09			
67	5	1,08E+10			
68	10	1,50E+10			

	S	T	U	V	W
71	Parámetros				
72	Cantidad de Bagacillo		1	g	
73				ppm	
74	Floculante		LIPEZA 1622		
75					
76	Concentración floculante	Resistencia de la torta			
77	0	9,86E+09			
78	5	1,19E+10			
79	10	1,37E+10			

ANEXO 3

Diseño experimental realizado para el capítulo III, este anexo presenta los atributos del diseño factorial multinivel donde muestra el número de factores experimentales, número de bloques, número de ejecuciones, grados de libertad para el error y la aleatorización realizado en el software Statgraphics. Utilizado para estudiar la interacción entre múltiples factores y sus efectos en la variable de respuesta.

- Libro de Datos
- StatAdvisor
- StatGallery
- StatReporter
- Comentarios del StatFolio
- StatLog
- Escritorio
- Atributos de Diseño Factoria
- Analizar Experimento - Tasa
- Analizar Experimento - Resis

Atributos de Diseño Factorial Multinivel

Clase de diseño: Factorial Multinivel
Nombre del archivo:

Diseño Base
 Número de factores experimentales: 3
 Número de bloques: 2
 Número de respuestas: 3
 Número de ejecuciones: 36
 Grados de libertad para el error: 26
 Aleatorizar: Sí

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Tipo de floculante	0,0	1,0	2	
Con floculante	0,0	10,0	3	ppm
Cant bagacillo	0,0	2,0	3	gr

Respuestas	Unidades
Espesor torta	mm
Tasa filtración	ml/s
Resistencia torta	

El StatAdvisor
 Usted ha creado un diseño factorial multinivel que consiste de 36 ejecuciones. El diseño deberá ser ejecutado en 2 bloques. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Esto aportará protección contra el efecto de variables ocultas.

- Libro de Datos
- StatAdvisor
- StatGallery
- StatReporter
- Comentarios del StatFolio
- StatLog
- Escritorio
- Atributos de Diseño Factoria
- Analizar Experimento - Tasa
- Analizar Experimento - Resis

	BLOQUE	Tipo de floculante	Con floculante	Cant bagacillo	Espesor torta	Tasa filtración	Resistencia torta
	Entero	Númerico	ppm	g	mm	ml/s	Númerico
		Númerico	Númerico	Númerico	Númerico	Númerico	Númerico
1	1	1	5	2	7	0,093	2,33031E10
2	1	0	0	1	3	0,053	9,86412E9
3	1	0	10	0	7	0,118	1,49919E10
4	1	1	0	1	2,5	0,08	2,76048E10
5	1	1	5	1	5,3	0,093	2,08929E10
6	1	1	0	2	3,8	0,127	1,04358E10
7	1	1	5	0	4,6	0,127	1,10237E10
8	1	1	10	0	7,2	0,129	1,30453E10
9	1	0	10	1	8	0,12	1,37016E10
10	1	1	10	2	8,1	0,127	1,37847E10
11	1	1	0	0	2	0,124	9,17213E9
12	1	0	0	2	3,7	0,108	1,03635E10
13	1	0	0	0	2,1	0,125	9,24019E9
14	1	0	5	2	6,2	0,13	1,22476E10
15	1	0	5	1	5,8	0,146	1,19356E10
16	1	0	5	0	4,3	0,129	1,08013E10
17	1	1	10	1	7,3	0,114	1,31265E10
18	1	0	10	2	8,1	0,094	1,22476E10
19	2	0	0	0	3	0,127	7,38636E9
20	2	0	5	2	6,7	0,137	1,01E10
21	2	0	10	1	7,3	0,114	2,30127E10
22	2	0	0	1	3	0,058	4,98199E10
23	2	1	5	2	6,4	0,101	2,33031E10

-  Libro de Datos
-  StatAdvisor
-  StatGallery
-  StatReporter
-  Comentarios del StatFolio
-  StatLog
-  Escritorio
-  Atributos de Diseño Factoria
-  Analizar Experimento - Tasa
-  Analizar Experimento - Resis

	BLOQUE	Tipo de floculante	Con floculante	Cant bagacillo	Espesor torta	Tasa filtracion	Resistencia torta
			ppm	g	mm	ml/s	
	Entero	Número	Número	Número	Número	Número	Número
22	2	0	0	1	3	0,058	4,98199E10
23	2	1	5	2	6,4	0,101	2,33031E10
24	2	1	10	0	6,1	0,127	9,0067E9
25	2	1	0	1	3	0,078	1,35051E10
26	2	1	0	0	3	0,114	2,22303E10
27	2	1	5	0	4	0,135	9,97306E9
28	2	1	0	2	3	0,135	9,44126E9
29	2	0	5	1	5,5	0,147	8,76986E9
30	2	1	10	1	6,3	0,118	1,11824E10
31	2	0	0	2	3	0,137	9,34331E9
32	2	0	5	0	4,7	0,137	7,96373E9
33	2	1	5	1	5,3	0,135	1,04503E10
34	2	0	10	2	8,4	0,118	8,9439E9
35	2	1	10	2	8,3	0,137	1,2458E11
36	2	0	10	0	6,2	0,135	1,16559E10