

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA ACADEMICA PROFESIONAL INGENIERIA AGROINDUSTRIAL



**“EFECTO DEL PH Y TEMPERATURA EN LA CLARIFICACIÓN DEL
JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum Officinarum*) POR
CARBONATACIÓN”**

Presentado por:

Bach. Avalos Ludeña Jenrry

Bach. Ponte Ramirez Reynaldo

ASESOR:

M.Sc. Castañeda Domínguez Jorge

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AGROINDUSTRIAL**

Nuevo Chimbote – Perú

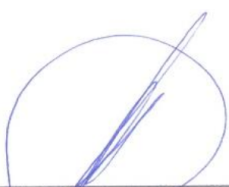
2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL




HOJA DE AVAL DEL JURADO EVALUADOR

El presente trabajo de tesis titulado: **“EFECTO DEL PH Y TEMPERATURA EN LA CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*) POR CARBONATACIÓN**”, para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial, presentado por los bachilleres, **AVALOS LUDEÑA JENRRY** y **PONTE RAMÍREZ REYNALDO**, que tiene como asesor al **M.Sc. JORGE DOMINGUEZ CASTAÑEDA** designado por resolución N° 372 - 2018-UNS-FI. Ha sido revisado y aprobado el día 22 de Julio del 2019, por el siguiente jurado evaluador designado mediante resolución N°268-2019-UNS-CFI.



Dr. Víctor Castro Zavaleta
Presidente

M. Sc. Saúl Eusebio Lara
Secretario



Dr. Daniel Sánchez Vaca
Integrante



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA



FACULTAD DE INGENIERÍA E.A.P. DE INGENIERÍA DE AGROINDUSTRIAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:30 am del 22 de Julio del dos mil diecinueve se instaló en el Auditorio de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Agroindustrial, el Jurado Evaluador, designado mediante resolución N°268-2019-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dr. Víctor Castro Zavaleta** (Presidente)
- **M. Sc. Saúl Eusebio Lara** (Secretario)
- **Dr. Daniel Sánchez Vaca** (Integrante); para inicio a la Sustentación y Evaluación de Tesis, titulada:

“EFECTO DEL PH Y TEMPERATURA EN LA CLARIFICACION DEL JUGO DE CAÑA DE AZUCAR (*Saccharum officinarum*) POR CARBONATACION”, elaborada por los bachilleres en Ingeniería Agroindustrial.

- **Avalos Ludeña Jenrry**
- **Ponte Ramírez Reynaldo**

Asimismo, tienen como Asesor al docente: **Ms. Jorge Domínguez Castañeda**


Finalizada la sustentación, los Tesisistas respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y el Público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes y en concordancia con el Artículo 39° y 40° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
AVALOS LUDEÑA JENRRY	<u>18</u>	<u>Muy Bueno</u>

Siendo las 12:30 p.m del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el presente jurado.

Nuevo Chimbote, 22 de Julio del 2019.



Dr. Víctor Castro Zavaleta
Presidente



M. Sc. Saúl Eusebio Lara
Secretario



Dr. Daniel Sánchez Vaca
Integrante



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA



FACULTAD DE INGENIERÍA E.A.P. DE INGENIERÍA DE AGROINDUSTRIAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:30 am del 22 de Julio del dos mil diecinueve se instaló en el Auditorio de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Agroindustrial, el Jurado Evaluador, designado mediante resolución N°268-2019-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dr. Víctor Castro Zavaleta** (Presidente)
- **M. Sc. Saúl Eusebio Lara** (Secretario)
- **Dr. Daniel Sánchez Vaca** (Integrante); para inicio a la Sustentación y Evaluación de Tesis, titulada:

“EFECTO DEL PH Y TEMPERATURA EN LA CLARIFICACION DEL JUGO DE CAÑA DE AZUCAR (*Saccharum officinarum*) POR CARBONATACION”, elaborada por los bachilleres en Ingeniería Agroindustrial.

- **Avalos Ludeña Jenrry**
- **Ponte Ramírez Reynaldo**

Asimismo, tienen como Asesor al docente: **Ms. Jorge Domínguez Castañeda**


Finalizada la sustentación, los Tesistas respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y el Público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspecto relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes y en concordancia con el Artículo 39° y 40° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
PONTE RAMÍREZ REYNALDO	18	Muy Bueno

Siendo las..... del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el presente jurado.

Nuevo Chimbote, 22 de Julio del 2019.



Dr. Víctor Castro Zavaleta
Presidente



M. Sc. Saúl Eusebio Lara
Secretario



Dr. Daniel Sánchez Vaca
Integrante

DEDICATORIA

A Dios por darnos la fuerza, bendición y protección todos los días.

A mis padres; Irma Cristina Ramírez Lara y Reynaldo Ponte Jugo, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí, son mi motivo para seguir adelante.

A mi hermana por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, a mí enamorada por sus consejos y palabras de aliento y por estar conmigo en todo momento, gracias.

AGRADECIMIENTO

A la escuela de ingeniería agroindustrial por las áreas implementadas y equipadas que sirvieron para el desarrollo de esta tesis.

A los profesores todos, involucrados de manera directa e indirecta en esta tesis que mediante sus conocimientos y consejos nos ayudaron en la elaboración de esta tesis

A mi compañero de Tesis Jenrry por su apoyo incondicional durante toda esta etapa de la tesis.

Al ingeniero Daniel Sánchez Vaca por su gran apoyo desinteresado y sabios consejos.

A los ingenieros Lenin Palacios, John Gonzales y Elizabeth Contreras por su apoyo en la realización de la parte práctica de la tesis y a la srta Silvia por su apoyo con la recopilación de información, a todos ellos gracias por su compromiso y amistad.

REYNALDO

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí, son mi motivo para seguir adelante, a mí enamorada por sus consejos y palabras de aliento y por estar conmigo en todo momento, gracias.

AGRADECIMIENTO

A todos los profesores, involucrados de manera directa e indirecta en esta tesis que mediante sus conocimientos y consejos nos ayudaron en la elaboración de esta tesis.

A mi compañero de Tesis Reynaldo por su apoyo, al Dr. Daniel Sánchez Vaca y M.Sc. Castañeda Domínguez Jorge por su gran apoyo desinteresado y sabios consejos.

A los ingenieros Lenin Palacios, John Gonzales y Elizabeth Contreras por su apoyo en la realización de la parte práctica de la tesis y a la srta Silvia por su apoyo con la recopilación de información, a todos ellos gracias por su compromiso y amistad.

JENRRY

RESUMEN

Actualmente la industria azucarera es un mercado de gran demanda por lo que se ve en la obligación de mejorar y optimizar su tecnología de producción, debido a las estrictas normas de calidad azucarera, “CODEX para los azúcares codex stan 212-1999” y “RM N° 684-2005/MINSA”, siendo la etapa de clarificación una de sus etapas críticas en su proceso productivo debido a la utilización de SO₂ llamado clarificación por el método de sulfitación, la cual ha presentado algunas restricciones en cuanto a su uso debido a las normas de seguridad alimentaria que exigen cada vez menores compuestos a base de azufre, a la vez ocasiona las pérdidas de sacarosa por inversión por los bajos valores de pH empleado en el proceso, en respuesta a las estrictas normas y parámetros de calidad se realizó esta investigación del proceso de clarificación por el método de carbonatación (CO₂ gaseoso) del jugo de caña, ya que se han obtenido resultados positivos en otras investigaciones como Hamerski, (2009), con los objetivos de aportar parámetros óptimos para su empleo en la obtención de azúcar del jugo de caña variando los parámetros de pH (9, 11 y 13), temperatura de 50, 70 y 90°C y tiempo de 20, 25 y 30 minutos, obtener sus características fisicoquímicas del jugo de caña y determinar el comportamiento de los °Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores en función a los parámetros de temperatura, pH y tiempo durante el proceso de carbonatación.

El jugo de caña de variedad Mexico-73, presenta las características fisicoquímicas de $16 \pm 0.3^\circ\text{Brix}$, $60.8 \pm 0.8^\circ\text{S}$, $0.73 \pm 0.2 \text{ g/l}$ de azúcares reductores y $1830 \pm 7.1 \text{ NTU}$; luego de obtener las cinéticas de los °Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores se determinó modelo predictivo de cada variable respuesta, la cual se representa por el modelo Medilli: $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ ajustado con los valores $[a=850, k=5, n=50 \text{ y } b=1.5]$ para turbidez con $R^2: 0.79$, $[a=0.7, k=-0.5, n= 0.006 \text{ y } b= 0.001]$ para azúcares reductores con $R^2: 0.85$, la cinética de sacarosa presentan el mismo modelo pero diferentes valores de sus constantes modelo 1 (Anexo 3): $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ ajustado con los valores $[a= 32.47, k= 0.19, n=0.007, b= 0.001]$ con $R^2: 0.89$ y modelo 2 (Anexo 3) ajustado con los valores $[a= 31, k= -0.2, n=0.09, b= 0.01]$ con $R^2:0.87$; la cinética de °Brix presentan el mismo modelo pero diferentes valores de sus constantes modelo 1: $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ ajustado con los valores $[a= 7.996, k= 0.029, n= 0.192, b= 0.01]$ con $R^2:0.78$ y modelo 2 (Anexo 3) ajustado con los valores $[a= 8, k= -0.2, n=- 0.19, b= 0.019]$ con $R^2:0.82$.

Los valores óptimos del proceso de clarificación por carbonatación fueron a un pH de 10.64, tiempo de 27 minutos y temperatura de 90°C predichos mediante el diseño factorial 3^k

(Design - DOE, $(3^k (k-p))$), compuesto de 3k experimentos, siendo $k = 3$ (variables): mostrando resultados predichos por el diseño de 7.65 °Brix, 47.09 °S, 0.18 g/l de azúcares reductores y 10.13 NTU, los cuales se validaron con los resultados obtenidos de 8.83 °Brix con una desviación de 0.82%, 44.38°S con desviación de 1.91%, 4.94 NTU con desviación de 3.67% y 0.21 g/l de azúcares reductores, comprueban que el diseño estadístico aplicado es el adecuado con respecto a los datos obtenidos.

Por último se demostró que por el método de carbonatación se obtienen mejores resultados de 2.04 °Brix, siendo mayor en comparación con el método de sulfitación utilizado por san Jacinto, se obtuvo 34.7% más de contenido de sacarosa en el medio, un mínimo contenido 0.21 g/l de azúcares reductores a diferencia del mínimo contenido que indica san Jacinto de 0.8 g/l de azúcares reductores, a la vez se obtuvo 4.94 NTU el cual está debajo del mínimo presentado por san Jacinto de 2000 NTU en su proceso de clarificación por el método de sulfitación.

ABSTRACT

Currently the sugar industry is a market in high demand so it is necessary to improve and optimize its production technology, due to the strict standards of sugar quality, "CODEX for sugar codex stan 212-1999" and "RM No. 684-2005 / MINSA ", being the stage of clarification one of its critical stages in its production process due to the use of SO₂ called clarification by the sulphitation method, which has presented some restrictions regarding its use due to the food safety standards that increasingly demand lower sulfur-based compounds, while causing losses of sucrose by investment due to the low pH values used in the process, in response to strict standards and quality parameters this research was carried out of the clarification process by the carbonation method (gaseous CO₂) of cane juice, since positive results have been obtained in other investigations such as Hamerski, (2009), with the objectives of providing optimum parameters for its use in obtaining sugar cane juice by varying the pH parameters (9, 11 and 13), temperature of 50, 70 and 90°C and time of 20, 25 and 30 minutes, obtain their physicochemical characteristics of cane juice and determine the behavior of the °Brix, sucrose, turbidity and reducing sugars according to the parameters of temperature, pH and time during the carbonation process.

The juice of cane of variety Mexico-73, presented the physicochemical characteristics of 16 ± 0.3 °Brix, 60.8 ± 0.8 °S, 0.73 ± 0.2 g/l of reducing sugars and 1830 ± 7.1 NTU; After obtaining the kinetics of °Brix, sucrose, turbidity and reducing sugars, a predictive model of each response variable was determined, which is represented by the Medilli model: $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ adjusted with the values $[a = 850, k = 5, n = 50$ and $b = 1.5]$ for turbidity with R²: 0.79, $[a = 0.7, k = -0.5, n = 0.006$ and $b = 0.001]$ for reducing sugars with R²: 0.85, the kinetics of sucrose present the same model but different values of their constants model 1 (Annex 3): $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ adjusted with the values $[a = 32.47, k = 0.19, n = 0.007, b = 0.001]$ with R²: 0.89 and model 2 (Annex 3) adjusted with the values $[a = 31, k = -0.2, n = 0.09, b = 0.01]$ with R²: 0.87; the kinetics of °Brix present the same model but different values of its constants model 1: $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ adjusted with the values $[a = 7.996, k = 0.029, n = 0.192, b = 0.01]$ with R²: 0.78 and model 2 (Annex 3) adjusted with the values $[a = 8, k = -0.2, n = -0.19, b = 0.019]$ with R²: 0.82.

The optimal values of the carbonation clarification process were at a pH of 10.64, time of 27 minutes and temperature of 90°C predicted by the 3^k factorial design (Design - DOE, (3^k (kp))), composed of 3^k experiments, being k = 3 (variables): showing results predicted by

the design of 7.65 °Brix, 47.09 °S, 0.18 g / l of reducing sugars and 10.13 NTU, which were validated with the results obtained of 8.83 °Brix with a deviation of 0.82%, 44.38°S with deviation of 1.91%, 4.94 NTU with deviation of 3.67% and 0.21 g / l of reducing sugars, they verify that the statistical design applied is adequate with respect to the data obtained.

Finally it was demonstrated that by the carbonation method, better results of 2.04 ° Brix are obtained, being higher compared to the sulphitation method used by San Jacinto, 34.7% more content of sucrose was obtained in the medium, a minimum content of 0.21 g / l of reducing sugars, unlike the minimum content indicated by san Hyacinth of 0.8 g / l of reducing sugars, at the same time 4.94NTU was obtained which is below the minimum presented by San Jacinto of 2000 NTU in its clarification process by the sulphitation method.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCION	20
2. REVISION BIBLIOGRAFICA	22
2.1. Caña de azúcar y jugo de caña.....	22
2.1.1. Definición	22
2.1.2. Variedades	22
2.1.3. Jugo de caña de azúcar	23
2.1.4. Composición química de las sustancias presentes en el jugo diluido.....	26
2.2. Clarificación del jugo de caña	33
2.2.1. Consideraciones generales.....	33
2.3. Sulfitación.....	35
2.3.1. Principales reacciones	36
2.4. Carbonatación.....	38
2.4.1. Principales reacciones	38
2.4.2. Factores que influyen en la carbonatación.	40
3. Materiales y metodos	45
3.1. Lugar De Ejecución	45
3.2. Materia Prima E Insumos	45
3.2.1. Materia prima:	45
3.2.2. Gas carbónico	45
3.2.3. Oxido de Calcio	46
3.2.4. Sistema para la carbonatación	47
3.2.5. Equipos	48
3.2.6. Materiales de Laboratorio.....	48
3.2.7. Otros Materiales	49
3.2.8. Reactivos	49

3.3. Métodos y analisis	50
3.3.1. Analisis y caracterizacion fisico quimica proximal.....	50
3.4. Metodologia experimental.....	52
3.4.1. Recepción de materia prima:	53
3.4.2. Extracción del jugo.....	53
3.4.3. Caracterización del jugo de caña.....	53
3.4.4. Etapa de clarificación por carbonatación	55
3.4.5. Final de reacción.....	55
3.4.6. Adición del floculante	55
3.4.7. Sedimentación	55
3.4.8. Centrifugación	56
3.4.9. Remoción de jugo clarificado.....	56
3.4.10. Análisis	56
3.5. Técnica de procesamiento y análisis de datos	57
4. Resultados y discusiones	59
4.1. Pruebas preliminares.....	59
4.2. Caracterización fisicoquímica del jugo de caña de azúcar	61
4.3. Cinética de reacción de los °Brix, sacarosa, azucares reductores y turbidez en el jugo de caña	62
4.3.1. Cinética de reacción de los °Brix en la clarificación del jugo de caña.....	63
4.3.2. Cinética de reacción de sacarosa en la clarificación del jugo de caña.	66
4.3.3. Cinética de reacción de turbidez.....	71
4.3.4. Cinética de reacción de azucares reductores	75
4.4. Modelamiento de las cinéticas de reacción en la clarificación del jugo de caña.....	80
4.5. Optimización de los °Brix en la clarificación del jugo de caña.....	81
4.5.1. Análisis de varianza para los °Brix.....	81

4.5.2.	Diagrama de Pareto para los °Brix en la clarificación del jugo de caña.....	83
4.5.3.	Optimización de los °Brix en la clarificación del jugo de caña.....	85
4.3.	Optimización de la sacarosa en la clarificación del jugo de caña.....	90
4.3.1.	Análisis de varianza para Sacarosa.....	90
4.3.2.	Diagrama de Pareto para sacarosa en la clarificación del jugo de caña.....	92
4.3.3.	Optimización de sacarosa en la clarificación del jugo de caña.....	95
4.4.	Optimización de la Turbidez en la clarificación del jugo de caña.....	99
4.4.1.	Análisis de varianza para Turbidez.....	99
4.4.2.	Diagrama de Pareto para turbidez en la clarificación del jugo de caña.....	101
4.4.3.	Optimización de turbidez en la clarificación del jugo de caña.....	103
4.5.	Optimización de los azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.....	108
4.5.1.	Análisis de varianza para Turbidez.....	108
4.5.2.	Diagrama de Pareto para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.....	110
4.5.3.	Optimización de los azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.....	112
4.6.	Optimización conjunta de °Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña por carbonatación.....	116
4.7.	Validación del modelo experimental.....	119
4.	Conclusiones.....	124
5.	Recomendaciones.....	125
6.	Referencias bibliográficas.....	126
7.	Anexo.....	129
Anexo 1	130
Determinación de la curva de calibrado para azúcares reductores.....		130
Anexo 2	131
Resultado: Tablas de °Brix.....		131
Resultado: Tablas de Sacarosa.....		135

Resultado: Tablas de Turbidez.....	140
Resultado: Tablas de Azucares Reductores	144
Anexo 3	149
Modelamiento para los °Brix.....	149
Modelamiento para Sacarosa	150
Modelamiento para Turbidez	151
Modelamiento para Azucares Reductores.....	152

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición de jugo de caña de azúcar y solidos solubles en el jugo.....	24
Tabla 2: Clasificación de las partículas dispersas en el jugo de caña.	25
Tabla 3: Composición de carbohidratos en el jugo de caña.....	26
Tabla 4: Composición de minerales en el jugo diluido.....	27
Tabla 5: Ácidos orgánicos no nitrogenados presentes en el jugo de caña diluido.....	28
Tabla 6: Aminoácidos presentes en el jugo de caña diluido.	29
Tabla 7: Efecto del pH en la eficiencia del CO ₂ en la clarificación del jugo de caña.	40
Tabla 8: Variables independientes y región experimental.	57
Tabla 9: Matriz de planeamiento experimental factorial completo (3 ^k).....	58
Tabla 10: Caracterización fisicoquímica del jugo de caña de azúcar	61
Tabla 11: Corridas experimentales para obtener los °Brix.....	81
Tabla 12: Análisis de Varianza (ANOVA) para °Brix en el jugo de caña clarificado por carbonatación.	82
Tabla 13: Valores óptimos para los °Brix en la clarificación del jugo de caña.....	89
Tabla 14: Corridas experimentales para obtener Sacarosa.....	90
Tabla 15: Análisis de Varianza (ANOVA) para Sacarosa en el jugo de caña clarificado por carbonatación.	91
Tabla 16: Valores óptimos para sacarosa en la clarificación del jugo de caña.	98
Tabla 17: Corridas experimentales para obtener Turbidez.	99
Tabla 18: Análisis de Varianza (ANOVA) para Turbidez en el jugo de caña clarificado por carbonatación.	100
Tabla 19: Valores óptimos para la remoción de turbidez en la clarificación del jugo de caña.	107
Tabla 20: Corridas experimentales para obtener Azucares Reductores.....	108
Tabla 21: Análisis de Varianza (ANOVA) para azucares reductores en el jugo de caña clarificado por carbonatación.....	109
Tabla 22: Valores óptimos para la degradación de los azucares reductores en la clarificación del jugo de caña.....	116
Tabla 23: Condiciones óptimas de la clarificación del jugo de caña por carbonatación que logran maximizar la función deseabilidad.	118
Tabla 24: Valores óptimos de las variables respuesta en la clarificación de jugo de caña por carbonatación que maximiza la función deseabilidad.....	118

Tabla 25: Reporte de los valores de las variables respuesta durante 27 minutos a las condiciones óptimas de clarificación de jugo de caña.	120
Tabla 26: Valores óptimos con margen de error de las variables respuestas en la clarificación del jugo de caña que maximizan la deseabilidad.	122
Tabla 27: valores de absorbancia par diferentes diluciones de glucosa.	130
Tabla 28: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 9, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	131
Tabla 29: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 9, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	131
Tabla 30: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 9, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	132
Tabla 31: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 11, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	132
Tabla 32: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 11, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	133
Tabla 33: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 11, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	133
Tabla 34: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 13, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	134
Tabla 35: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 13, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	134
Tabla 36: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 13, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	135
Tabla 37: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 9, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	135
Tabla 38: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 9, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	136
Tabla 39: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 9, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	136
Tabla 40: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 11, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	137
Tabla 41: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 11, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.	137

Tabla 42: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 11, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	138
Tabla 43: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 13, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	138
Tabla 44: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 13, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	139
Tabla 45: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 13, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	139
Tabla 46: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 9, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	140
Tabla 47: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 9, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	140
Tabla 48: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 9, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	141
Tabla 49: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 11, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	141
Tabla 50: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 11, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	142
Tabla 51: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 11, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	142
Tabla 52: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 13, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	143
Tabla 53: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 13, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	143
Tabla 54: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 13, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	144
Tabla 55: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 9, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	144
Tabla 56: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 9, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	145
Tabla 57: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 9, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	145
Tabla 58: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 1, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	146

Tabla 59: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 11, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	146
Tabla 60: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 11, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.....	147
Tabla 61: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 13, temperatura: 50°C y tiempo: 20, 25 y 30 minutos.....	147
Tabla 62: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 13, temperatura: 70°C y tiempo: 20, 25 y 30 minutos.....	148
Tabla 63: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 13, temperatura: 90°C y tiempo: 20, 25 y 30 minutos.....	148

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura básica de los compuestos polifenólicos en el jugo de caña.....	31
Figura 2: Posibles vías de la termólisis de la sacarosa en el jugo de caña.	32
Figura 3: Modelo eléctrico de la cama dual de una superficie de partícula con carga negativa.	34
Figura 4: El efecto de la adición de CaO en la decoloración, Moodley (1992).....	42
Figura 5: Caña de azúcar quemada. Variedad México 73.....	45
Figura 6: Balón de CO ₂ de 75 kg	46
Figura 7: óxido de calcio	47
Figura 8: Esquema de sistema de carbonatación.....	47
Figura 10: La sacarosa compuesta por 2 unidades de monosacáridos de α -D-glucosa y 1 molécula de β -D-fructosa unidas por el enlace α -1,2 glucosídico.....	68

INDICE DE GRAFICOS

Grafico 1: Variación del pH del medio a un flujo constante de CO ₂ (2Lpm) durante la clarificación.....	60
Grafico 2: Cinética de reacción de °Brix en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 9 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	63
Grafico 3: Cinética de reacción de °Brix en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 11 y Temperatura de 50, 70 y 90°C.....	64
Grafico 4: Cinética de reacción de °Brix en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 13 y Temperatura de 50, 70 y 90°C.....	65
Grafico 5: Cinética de reacción de Sacarosa en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 9 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	66
Grafico 6: Cinética de reacción de Sacarosa en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 11 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	68
Grafico 7: Cinética de reacción de Sacarosa en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 13 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	69
Grafico 8: % de remoción de turbidez a 50°C (pH: 9, 11,13); 70°C (pH: 9, 11, 13); y 90°C (pH: 9, 11, 13).	71
Grafico 9: Cinética de reacción de Turbidez en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 9 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	72
Grafico 10: Cinética de reacción de Turbidez en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 11 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	73
Grafico 11: Cinética de reacción de Turbidez en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 13 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	74
Grafico 12: azúcares reductores (g/l) a 50°C (pH: 9, 11,13); 70°C (pH: 9, 11, 13); y 90°C (pH: 9, 11, 13).	75
Grafico 13: Cinética de reacción de Azúcares Reductores en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 9 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	77
Grafico 14: Cinética de reacción de Azúcares Reductores en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 11 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	78
Grafico 15: Cinética de reacción de Azúcares Reductores en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 13 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.....	78
Grafico 16: Diagrama de Pareto de los factores y sus efectos estandarizados para los °Brix en el jugo de caña clarificado por carbonatación.	84
Grafico 17: Gráfico de efectos principales para °Brix en la clarificación del jugo de caña.	84

Grafico 18: Gráfico de interacciones para °Brix en la clarificación del jugo de caña.	85
Grafico 19: Superficie respuesta para optimizar los °Brix en el proceso de clarificación por carbonatación tomando como ejes dos de sus factores, temperatura y pH.	87
Grafico 20: Contorno de superficie respuesta para los °Brix en la clarificación del jugo de caña.....	88
Grafico 21: Diagrama de Pareto de los factores y sus efectos estandarizados para Sacarosa en el jugo de caña clarificado por carbonatación.	93
Grafico 22: Gráfico de efectos principales para Sacarosa en la clarificación del jugo de caña.....	93
Grafico 23: Gráfico de interacciones para °Brix en la clarificación del jugo de caña.	94
Grafico 24: Superficie respuesta para optimizar sacarosa en el proceso de clarificación por carbonatación tomando como ejes dos de sus factores, temperatura y pH.	96
Grafico 25: contorno de superficie respuesta para sacarosa en la clarificación del jugo de caña.....	97
Grafico 26: Diagrama de Pareto de los factores y sus efectos estandarizados para turbidez en la clarificación del jugo de caña..	102
Grafico 27: Gráfico de efectos principales para turbidez en la clarificación del jugo de caña.	102
Grafico 28: Gráfico de interacciones para turbidez en la clarificación del jugo de caña... ..	103
Grafico 29: Superficie respuesta y contorno para optimizar turbidez en el proceso de clarificación por carbonatación tomando como ejes dos de sus factores, temperatura y pH.	105
Grafico 30: Contorno de superficie respuesta para Turbidez en la clarificación del jugo de caña.....	106
Grafico 31: Diagrama de Pareto de los factores y sus efectos estandarizados para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.	111
Grafico 32: Gráfico de efectos principales para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.....	111
Grafico 33: Gráfico de interacciones para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.....	112
Grafico 34: Superficie respuesta y contorno para optimizar azúcares reductores en el proceso de clarificación por carbonatación tomando como ejes dos de sus factores, temperatura y pH.....	114

Grafico 35: Contorno de superficie respuesta para azucares reductores en la clarificación del jugo de caña.....	115
Grafico 36: Superficie respuesta para maximizar la función deseabilidad de la clarificación del jugo de caña por carbonatación.	117
Grafico 37: Contorno de superficie respuesta para maximizar la función deseabilidad en la clarificación del jugo de caña por carbonatación.	117
Grafico 38: Cinética de °Brix para las condiciones de clarificación de jugo de caña optima de 90°C, 27 minutos y pH 10.6.	120
Grafico 39: Cinética de sacarosa para las condiciones de clarificación de jugo de caña optima de 90°C, 27 minutos y pH 10.6.	121
Grafico 40: Cinética de azucares reductores para las condiciones de clarificación de jugo de caña optima de 90°C, 27 minutos y pH 10.6.	121
Grafico 41: Cinética de turbidez para las condiciones de clarificación de jugo de caña optima de 90°C, 27 minutos y pH 10.6.	122
Grafico 42: curva de calibrado de glucosa.	130
Grafico 43: Modelamiento para los °Brix a pH: 9 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C (Modelo 1).....	149
Grafico 44: Modelamiento para los °Brix a pH: 11 y 13 y temperaturas de 50, 70 y 90°C (Modelo 2).....	149
Grafico 45: Modelamiento para sacarosa (°S) a pH: 11 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C, pH: 9 y temperatura: 70°C (Modelo 1).....	150
Grafico 46: Modelamiento para sacarosa (°S) a pH: 13 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C, pH: 9 y temperatura: 50°C (Modelo 2).....	150
Grafico 47: Modelamiento para Turbidez (NTU) a pH: 9, 11 y 13 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C.....	151
Grafico 48: Modelamiento para Azucares Reductores (g/l) a pH: 9, 11 y 13 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C.	152

1. INTRODUCCION

Perú, es el quinto país en América del Sur en producir caña de azúcar, en promedio mantiene una capacidad de 81 mil 231 hectáreas productivas, las cuales mantienen un rendimiento de 128,1 toneladas por hectárea ocasionando de esta forma que este producto se coloque en el noveno lugar dentro del ranking del PBI agrícola nacional, según cifras del Ministerio de Agricultura. La producción nacional se ve reflejada dentro de dos departamentos los cuales son Lambayeque (33%) y La Libertad (44%). (Trade Map).

Actualmente la producción de azúcar no abastece el mercado nacional en consecuencia, la industria del azúcar incorpora este año 13 550 hectáreas (Grupo GLORIA, 2018) en el Proyecto Olmos donde proyectan con su planta instalada procesar 10 mil toneladas diarias de este producto.

Por ende la industria azucarera se ve en la obligación de mejorar y optimizar su tecnología de producción, iniciando en realizar investigaciones en las etapas del proceso del azúcar, una de ellas es investigar el proceso de clarificación variando los parámetros de pH, temperatura y tiempo de reacción por el proceso de carbonatación (CO_2) del jugo de caña, para así aportar parámetros óptimos para su empleo en la obtención de azúcar del jugo de caña. (Moodley, 2001).

Actualmente, el proceso de sulfitación se lleva a cabo, por medio de la tostación de azufre elemental en hornos rotatorios; el azufre, en su proceso de combustión genera SO_2 , elemento que utilizado en su forma de SO_3 , inhibe la coloración de los jugos de la caña y por ende la coloración del azúcar final. Esto fue estudiado por el Dr. Millard (1912) científico francés, que determinó los procesos que se llevaban a cabo en ciertos alimentos, cuando eran sometidos a altas temperaturas, en presencia de sacarosa, proteínas y aminoácidos; descubrió que estos se tostaban, generando coloraciones oscuras y cientos de reacciones químicas que incluso ahora no han sido estudiadas a cabalidad. El mundo azucarero ha buscado una alternativa para sustituir la quema de azufre, principalmente por tres razones: la primera es por la reducción de pH en el jugo diluido que este sistema implica y la consecuente pérdida de sacarosa; segundo, por la alta corrosión que este proceso genera en todo el sistema metálico del ingenio y por último, por la falta de control que este procedimiento conlleva, lo que obliga a una sobredosificación de gases de combustión del azufre, aumentando los residuos de sulfitos, en el azúcar final.

Se plantean nuevas alternativas en la tecnología y un mejoramiento en la etapa de clarificación para así reducir el uso de SO_2 por lo siguiente se plantea el proceso de carbonatación para el jugo de caña, teniendo como desafío, la producción del azúcar cristal sin la utilización de la etapa de sulfitación, se han estudios para introducir el dióxido de carbono (CO_2) en sustitución del azufre, siendo este proceso conocido como carbonatación. (Moodley, 2001).

El proceso de carbonatación consiste básicamente en añadir CO_2 al jugo de caña, junto con la adición del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), conocido como leche de cal, estabilizando el pH y formando el complejo carbonato de calcio (CaCO_3), que funciona en el proceso como un aglutinador de sustancias suspendidas en el caldo, decantándolas más rápidamente (Hamersky, 2009).

Así, el objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de las variables pH, tiempo y temperatura, en la etapa de clarificación del jugo de caña de azúcar en el proceso de carbonatación, sobre las propiedades de mayor relevancia en el clarificado, es decir, contenido de sólidos solubles ($^\circ\text{Brix}$), contenido de azúcares reductores, contenido de sacarosa y turbidez.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1. Caña de azúcar y jugo de caña

2.1.1. Definición

Su nombre científico, *Saccharum officinarum* L., con nombre común “caña de azúcar”, y también conocida como caña de castilla, caña dulce, cañaduz, cañamelar, cañamiel y Sa-kar. Planta herbácea de gran tamaño que se cultiva en países tropicales y subtropicales. Es un híbrido complejo de varias especies, derivadas principalmente del *Saccharum officinarum*. La producción de caña varía significativamente de un área a otra, dependiendo de la variedad, utilizando factores climáticos, disponibilidad del agua, prácticas de cultivo y la duración del periodo de crecimiento; esta se propaga vegetativamente sembrando trozos de sus tallos. La nueva planta o retoño crece a partir de los cogollos o yemas de los nudos del tallo, asegurando así una descendencia uniforme. (Castro, 2015).

Tiene un tallo macizo de 2 a 5 metros de altura con numerosos entrenudos alargados vegetativamente. El sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo. El tronco de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades pequeñas. Las proporciones de los componentes varían de acuerdo con la variedad de la caña, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, entre otros. Sin embargo, unos valores de referencia general pueden ser: agua 73 - 76 %; sacarosa 8 - 15 %; fibra 11 - 16 %. Las hojas de la caña nacen en los entrenudos del tronco, a medida que crece la caña las hojas más bajas se secan, caen y son reemplazadas por las que aparecen en los entrenudos superiores; también nacen en los entrenudos las yemas que bajo ciertas condiciones pueden llegar a dar lugar al nacimiento de otra planta. (Comisión veracruzana de comercialización agr., 2004)

2.1.2. Variedades

Las variedades comerciales de caña de azúcar son híbridos inter-específicos, principalmente de *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L y *Saccharum robustum*. La acumulación de sacarosa en el tallo depende además de la

herencia (21 % *S. officinarum* L, 10 % *S. robustum* y 6 % *S. spontaneum* L) a factores morfológicos, enzimáticos, ambientales, disponibilidad de agua e incidencia de enfermedades. Los tallos con alta concentración de sacarosa tienen mayor contenido de humedad y menos fibra, además su epidermis es más gruesa y tienen mayor peso fresco (Miceli, 2002). Sin embargo, la respuesta agro-productiva del cultivo difiere según las condiciones de manejo, la región climática, el tipo de suelo, la variedad y otros factores (Adrián, 2005).

Las principales variedades de azúcar cultivadas en el Perú son 18. Estas variedades, difieren en características como brotamiento, formación de macollo, crecimiento, acamamiento, riqueza en pol y capacidad soquera. Las variedades de brote más rápido son la H44 – 3098, H50 – 7209, H52 – 4610, H55 – 8248. (Adrián, 2005).

2.1.3. Jugo de caña de azúcar

El jugo de caña está situado entre los entrenos de la fase sólida en la caña de azúcar, considerado como compuesto bifásico sólido - líquido. La fase sólida de la caña está constituida por un complejo pentoxan y lignocelulósico integrado por fibras celulósicas que forman los entrenos. La fase líquida o el jugo de caña es una solución acuosa que contiene una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, donde el 90% son los azúcares (Spencer & Meade citados por Hamerski, 2009).

Las características de composición de las variedades comerciales de la caña de azúcar y sólidos solubles del jugo de caña varían dentro de ciertos límites conforme el presentado (Tabla 1).

Tabla 1: Composición de jugo de caña de azúcar y solidos solubles en el jugo.

Componentes de jugo de caña	(%) en masa de caña de azúcar
Agua	73-76
Solidos	24-27
Solidos solubles	10-16
Fibra (Seca)	11-16
Contenido de jugo de caña	(%) en solidos solubles
Azucares	75-92
Sacarosa	70-88
Glucosa	2-4
Fructosa	2-4
Sales	3.0-4.5
Ácidos orgánicos	1.5-5.5
Ácidos carboxílicos	1.1-3.0
Aminoácidos	0.5-2.5
Otros no azucares orgánicos	
Proteínas	0.5-0.6
Almidón	0.001-0.100
Gomas	0.30-0.60
Ceras, fosfolípidos	0.05-0.15

FUENTE: Chen citado por Hamerski, 2009

El jugo de la caña que fluye de las molindas, destinado a la clarificación, puede ser descrito como un líquido opaco, que varía del color pardo al verde oscuro, espumoso y viscoso. Es una mezcla compleja, constituida por una suspensión estable a la que contiene un gran número de partículas con diferentes gamas de tamaño y composición química heterogénea (Aoki, 1987). El pH del jugo de caña también se presenta variación, situado en el rango entre 4,7 y 5,6 (Andrade, 1998). La clasificación de las partículas suspendidas o material suspendido (Tabla 2), en su mayoría, consiste de fragmentos de celulosa (bagacilho), tierra, arena, arcilla, almidón, ceras, grasas y gomas. Entre los componentes solubles del jugo se encuentran la sacarosa, glucosa, fructosa, proteínas, oligosacáridos, polisacáridos, ácidos orgánicos, aminoácidos y sales (Doherty & Rackemann, 2008).

Tabla 2: Clasificación de las partículas dispersas en el jugo de caña.

Dispersiones	Diámetro (µm)	% masa	Especie
Áspero	>0.1	2-5	Bagazo, arena, tierra
Coloidales	$0.001 < \square < 0.1$	0.05-0.3	Ceraproteínas, gomas, dextranas, almidón
Moleculares y iónicos	$\square < 0.001$	8-21	Azúcares (sacarosa, glucosa, fructosa, manosa). Las sales minerales (sulfatos, cloruros, silicatos, Fosfatos: K, Ca, Mg y Na). Ácidos orgánicos aconítico, oxálico, málico, etc

FUENTE: Delgado&Cesar, citados por Fabiane Hamerski, 2009.

La diferencia en la composición del jugo de la caña de azúcar es uno de los factores que afectan a las diversas operaciones unitarias de un proceso industrial, en particular la purificación del jugo y, en el caso de las destilerías, la fermentación alcohólica (Cesar et al., 1987).

Se destaca la influencia de innumerables parámetros en la formación del perfil del jugo de caña. Entre ellos: la variedad de la caña, tipo de suelo, abono, condiciones climáticas, grado de madurez de la caña, tipo de cosecha, tiempo entre la quema, el corte y el procesamiento, el contenido de las puntas y la paja y también, por ser una materia prima extractiva, por su forma de extracción (Souza, 1988).

La calidad de la caña para la industria no puede ser evaluada simplemente por su contenido de sacarosa, aunque sea el parámetro más importante, ya que, los demás factores citados tienen consecuencias directas de la composición tecnológica de la caña (Paranhos citado por Hamerski, 2009).

2.1.4. Composición química de las sustancias presentes en el jugo diluido.

2.1.4.1. Carbohidratos

La sacarosa se encuentra en mayor producción es, 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. (Hamerski, 2009).

Tabla 3: Composición de carbohidratos en el jugo de caña.

	Carbohidrato	Concentración
Monosacáridos (%)	Glucosa	0.26 - 0.33
	Fructosa	0.26 - 0.33
	Sacarosa	9.6 - 10.9
Disacáridos (%)	1 - Cestosa	0.26 - 0.33
	6 - Cestosa	0.03 - 0.5
Oligosacáridos (% Brix)	Neo-cestosa	0.01 - 0.4
Polisacáridos (% Brix)	Almidón	0.3 - 1.3

Fuente: Hamerski, 2009

2.1.4.2. Sales Orgánicas

Se presentan como iones y sales solubles o insolubles, constituyentes de macromoléculas orgánicas.

Tabla 4: Composición de minerales en el jugo diluido.

Constituyentes		Concentración
		(% brix)
	Potasio (K ₂ O)	0.77 - 1.31
	Sodio (Na ₂ O)	0.01 - 0.04
	Calcio (CaO)	0.24 - 0.48
	Magnesio (MgO)	0.1 - 0.39
	Hierro (Fe ₂ O ₃)	0.006 - 0.04
Cationes	Aluminio (Al ₂ O ₃)	0.0005 - 0.17
	Cobre (CuO)	0.002 - 0.003
	Zinc (ZnO)	0.003 - 0.012
	Manganeso (MnO)	0.007
	Cobalto (CoO)	0.00007
	Silicio (SiO ₂)	0.016 - 0.101
	Cloro (Cl)	0.16 - 0.27
Aniones	Fosfato (P₂O₅)	0.14 - 0.4
	Sulfato (como SO ₃)	0.17 - 0.52

Fuente: Giraldo M., 2005.

En algunos trabajos realizados se encontraron aumentos relevantes en la calidad del jugo claro tras la fertilización de suelos con fósforo, considerado 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 encalamiento, sobre todo si se encuentran en concentraciones entre 300 y 600 ppm. (Giraldo, 2005).

El Potasio es indispensable en la planta para la asimilación del carbono y síntesis de proteínas, el déficit 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. (Giraldo, 2005).

Otros elementos minerales como el sodio, calcio y magnesio son comunes en suelos salinos y tienen un efecto melasigénico (producción de mieles) muy relevante, que promueven la producción de mieles finales de alta pureza. (Larrahondo, 1995).

2.1.4.3. Ácidos Orgánicos

Se dividen en ácidos no nitrogenados y aminoácidos o nitrogenados (tabla 5 y tabla 6).

Tabla 5: Ácidos orgánicos no nitrogenados presentes en el jugo de caña diluido.

Formación	Ácidos	Concentración (ppm/% brix)
Naturales	Oxálico	40 – 200
	Cítrico	900 – 1800
	Tartárico	10 – 180
	Málico	1200 - 1800
	Aconítico	5000 - 8000
	Succínico	100 - 200
	Glicolítico	trazas - 150
Formados durante el proceso	Láctico	250 - 670
	Acético	200 - 300

Fuente:Larrahondo, 1995.

Tabla 6: Aminoácidos presentes en el jugo de caña diluido.

	Compuesto	Libre	%sólidos secos en proteína
	Asparagina	0.71	---
	Glutamina	0.19	---
	Aspártico	0.11	0.06
	Glutámico	0.05	0.08
	Alanina	0.06	0.05
Aminoácidos	Valina	0.03	0.04
	Aminobutírico	0.03	0.03
	Treonina	0.02	0.04
	Isoleucina	0.01	0.03
	Glicina	< 0.01	0.04
	otros	trazas	< 0.03

Fuente: Larrahondo, 1995.

Los aminoácidos son responsables del pH natural del jugo de caña y la capacidad de absorción de soluciones alcalinas como la cal (CaO_2) a causa de la concentración del ácido aconítico. La acidez es producida por los polietilenos que absorben oxígeno durante la clarificación disminuyendo el pH del jugo clarificado. (Larrahondo, 1995)

2.1.4.4. 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 en que se encuentra. 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). (Honig & Marín L., 2012).

2.1.4.5. Gomas

Están compuestas fundamentalmente por pentosanas y polisacáridos que al hidrolizarse producen azúcares del grupo pentosa. Las pentosanas como la arabana y la xilosa son sustancias coloidales hidrófilas que incrementan notoriamente la viscosidad de la meladura, debido a que no se eliminan completamente en el proceso de clarificación de jugo de caña. (Honig & Marín, 2012).

2.1.4.6. Pectinas

Son sustancias coloidales hidrofílicas que producen viscosidad elevada en las soluciones (0.1% de solución de pectina tiene viscosidad igual a la de una solución de azúcar al 10%). Su estructura general es un ácido poligalacturónico que 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. (Honig & Marín L., 2012).

2.1.4.7. Lípidos

En el jugo diluido existen apreciables cantidades de lípidos conformados por ceras, resinas y grasas en forma de partículas grandes o coloidales, al tener densidades bajas tienden a permanecer en la parte superior de los materiales en forma de nata según Svarovsky, (2000).

El contenido de lípidos totales de la caña, en base seca es, 0.69% en las hojas, 0.38% en los tallos, 0.54% en las raíces y 2.01% en las semillas, (Corporación

Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2007).

2.1.4.8. Compuestos coloreados

En el jugo diluido se encuentran principalmente compuestos polifenólicos, como los flavonoides, con estructuras de $C_6C_3C_6$ y dos anillos aromáticos característicos de fenol (A y B), los cuales son los pigmentos naturales más relevantes de la caña de azúcar. (Figura 1).

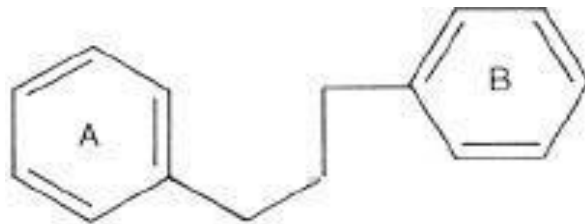


Figura 1: Estructura básica de los compuestos polifenólicos en el jugo de caña.

Los flavonoides tienen gran solubilidad en agua y se extraen de los tallos durante la molienda. Existen cinco clases (antocianinas, catequinas, chalcones, flavonoles, flavonas), de los cuales dos generan mayor impacto:

- **Antocianinas:** Constituidos por pigmentos catiónicos que generan color oscuro a pH bajo.
- **Flavonas:** Son colorantes ligeramente ácidos derivadas del tricino, luteolino y el apigenino, existen en forma no ionizada a pH bajo.

De forma general, los flavonoides aumentan rápidamente el color de los cristales de sacarosa cuando el pH de las soluciones oscila entre 7.0 y 9.0.

El color puede ser generado por reacciones durante el procesamiento a causa de interacciones de los compuestos de la caña, siendo las más comunes entre fenoles y sustancias nitrogenadas y/o los fenoles y el hierro. Algunos fenoles son incoloros en la caña, pero al oxidarse o reaccionar con aminas producen sustancias coloreadas. También se produce color a causa de la descomposición térmica de la sacarosa y sus monosacáridos (glucosa y fructosa) o por reacciones entre estos y sustancias amino- nitrogenadas que

generan unos compuestos coloreados denominados melanoidinas. Estas reacciones se conocen como “Reacciones de Maillard” (Figura 2). (Larrañondo J. 1995).

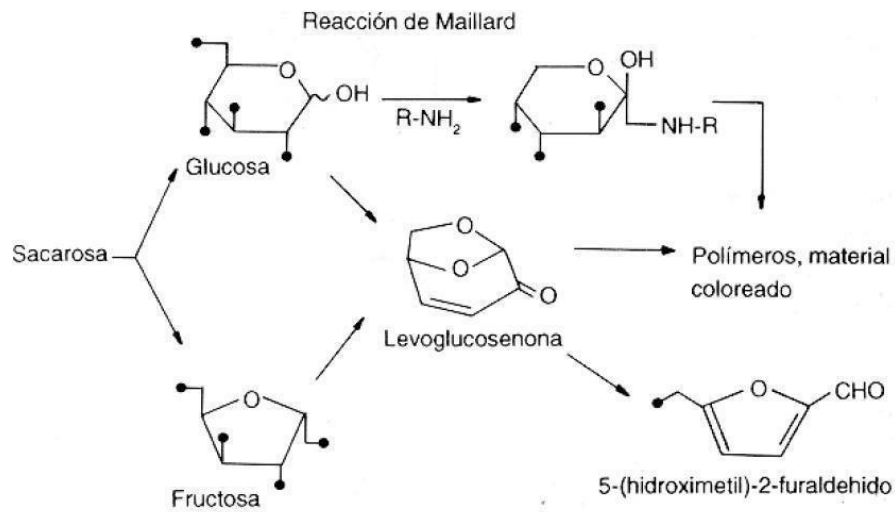


Figura 2: Posibles vías de la termólisis de la sacarosa en el jugo de caña.

Según Larrañondo, (1995), en el artículo de “Calidad de la Caña de Azúcar”, los precursores de color (amino-nitrogenados y fenoles) o materiales pigmentados en los jugos, se relacionan con la variedad de la caña, Además, un déficit o estrés de humedad puede incrementar el contenido de cuerpos coloreados, especialmente de amino-nitrogenados. (Larrañondo, 1995).

El hierro en el jugo diluido (proveniente de los molinos) produce un color oscuro dos o tres veces más intenso en medios alcalinos como consecuencia de las interacciones de sus sales con los polifenoles (como la lacasa). Las sales ferrosas se oxidan a férricas por la acción enzimática y son estas las que producen el color durante la combinación. (Honing & Marín , 2012).

Otras investigaciones como Corpoica, (2007), han demostrado que después de la clarificación de jugo de caña, el color tiende a aumentar cuando el contenido de calcio y nitrógeno es mayor.

2.2. CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA

2.2.1. Consideraciones generales

Según Doherty & Rackemann, (2008), es uno de los procesos unitarios más críticos de las plantas azucareras. Dado que la calidad de la clarificación influye en la filtración, en el cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el evaporador, la cristalización de la sacarosa y la calidad y cantidad del azúcar producido, a la vez afecta el color, la morfología de los cristales, las cenizas y el contenido de polisacáridos en el producto final,

El objetivo principal de la clarificación es la remoción de los no azúcares, impurezas presentes en el jugo mixto, las cuales se encuentran en la forma soluble, coloidal e insoluble en suspensión. (Aoki, 1987; Copersucar, 1987; Souza, 1988).

La clarificación debe ser conducida de manera que las pérdidas de sacarosa por inversión sea mínima y la destrucción de los azúcares reductores sea máxima durante el proceso subsecuente de recuperación del azúcar, al mismo tiempo maximice la tasa de sedimentación y obtenga un volumen de lodo mínimo, (Aoki et al, 1988).

El proceso consiste en promover la coagulación máxima de sus coloides y formar un precipitado insoluble que adsorba y arrastre las impurezas responsables por su apariencia turbia, separando la materia suspendida por sedimentación (Chen & Chou citados por Hamerski, 2009).

El jugo de caña, está constituido por diferentes elementos que forman una suspensión coloidal estable. Siendo la fuente más importante de esta estabilidad cinética, la carga eléctrica en la superficie de las pequeñas partículas que constituyen los coloides. Debido a esta carga, los iones con cargas de señales opuestas tienden a agruparse alrededor de ellas constituyendo una atmósfera iónica, (Atkins & De Paula, 2002). Por lo tanto, esta característica establece una diferencia de potencial entre las partículas. Conforme las partículas se aproximan unas de las otras, las fuerzas superficiales se vuelven más significativas, destacándose las

fuerzas de origen electrostático (fuerzas de enlace de larga distancia), Van der Waals (conexiones formadas del resultado de las fuerzas de corta distancia de actuación), adsorción y las reacciones de hidratación, (Ferreira, 1996).

Las capas cargadas eléctricamente sumadas a los efectos del movimiento térmico conducen a la formación de una doble capa eléctrica. En la Figura 3 se representa el modelo de la doble capa, considerando una partícula cargada negativamente. Este modelo prevé la existencia de una capa compacta (doble capa rígida) con el ordenamiento rígido de cargas positivas y negativas en los dos lados (sólido / solución) de la interfaz. Completa el modelo una segunda capa móvil y difusa con la carga eléctrica necesaria para completar la carga de la primera. La capa rígida obtiene el equilibrio de cargas entre las fases en contacto, (Aoki citado por Hamerski, 2009).

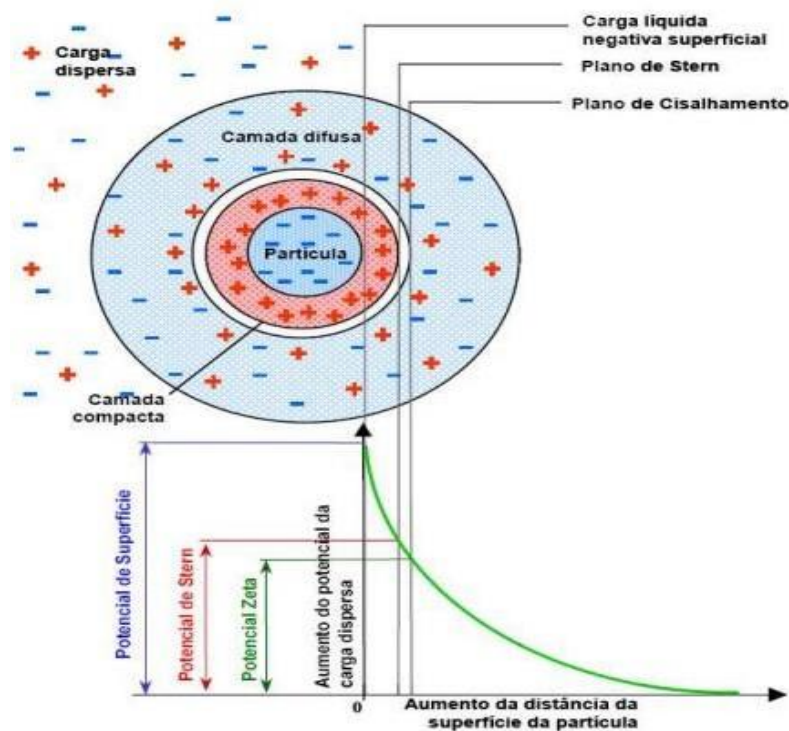


Figura 3: Modelo eléctrico de la cama dual de una superficie de partícula con carga negativa.

El efecto causado por la formación de cargas eléctricas en las interfaces, entre el plano de cizalla de la unidad y el medio circundante se denomina – Potencial Zetal (PZ), el cual, es responsable del comportamiento electrostático de la partícula

coloidal, (Aoki citado por Hamerski, 2009).

El potencial Zeta es un indicador útil de la carga superficial y se puede utilizar para prever y controlar la estabilidad de las suspensiones coloidales. Cuanto mayor sea el potencial Zeta, mayor es la probabilidad de que la suspensión sea estable, ya que las partículas cargadas se repelen unas a otras y esa fuerza supera la tendencia natural a la agregación (Chao, 2006). Es decir, el PZ de las partículas dispersas puede ser considerado una medida indirecta de la fuerza repulsiva entre las partículas dispersas.

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.
- **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).

2.3.Sulfitación

La sulfitación constituye el principal proceso de clarificación del jugo de caña empleado en las azucareras brasileñas que producen azúcar cristal blanco. Consiste básicamente, en la adición de dióxido de azufre gaseoso (SO₂) al jugo mixto, calentado a una temperatura de 60 ° C, hasta alcanzar el valor de pH entre 3,8 y 4,2 (aproximadamente 150 a 300 g de azufre por tonelada de caña) y posterior se alcaliza

con leche de cal hasta pH 7,0-7,2. La neutralización del jugo sulfitado, conduce a la formación del precipitado poco soluble, sulfito de calcio, el cual actúa en la adsorción de los compuestos coloreados y otras impurezas, luego el jugo es calentado a una temperatura entre 100-105 ° C y enviado a los sedimentadores para una remoción de compuestos precipitados, (Hamerski, 2009).

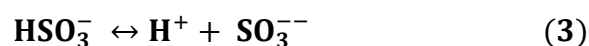
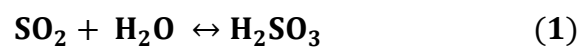
De forma similar a lo que ocurre en el proceso de defecación, la sulfitación puede ser conducida de diferentes maneras en función de la combinación entre los siguientes factores, presentados por Chen & Chou (1993):

- Secuencia de la adición de cal y SO₂: primero calado, de acuerdo con la normativa vigente.
- Temperatura: sulfitación en caliente o en frío, calentamiento gradual.
- Adición de los reactivos: batelada, continua, con control manual, con control automático.

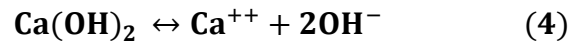
En el caso de que el jugo de caña tenga un bajo contenido de fosfato (<200 ppm) se hace la adición de fosfatos solubles permitiendo la formación del precipitado fosfato de calcio que contribuye a la retirada de impurezas del medio (Delgado & Cesar, 1977). Además, 2 a 5 ppm de un polielectrolito disuelto en agua con concentración de 0,1%, se emplean para auxiliar en la decantación (Bennett citado por Hamerski, 2009).

2.3.1. Principales reacciones

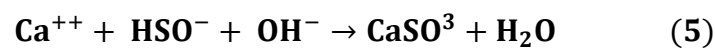
En primer lugar, el SO₂ gaseoso, al ser burbujado en el jugo de caña, es absorbido por el agua, hasta alcanzar el equilibrio formando el ácido sulfuroso, el cual acidifica el agua (ecuación 1). De acuerdo con la teoría de la disolución electrolítica, se ioniza, (ecuación 2 y 3), formando el ion bisulfito (Honig citado por Hamerski, 2009):



Con la adición de la leche de cal, los iones Ca^{++} y OH^- están disociados en el medio. (Ecuación 4).



En ese medio, se tiene en conjunto una reacción ácido-base que lleva a la neutralización de la acidez, anteriormente formada, y la obtención del precipitado sulfito de calcio (ecuación 5)



Este es el principio básico de la clarificación del jugo de caña, por sulfitación. En la práctica, la neutralización del ácido sulfuroso requiere un tiempo promedio y temperaturas mayores de 100 °C para reducir la solubilidad del sulfito de calcio, esta sal es más soluble a bajas temperaturas. El ideal es la formación de cristales voluminosos que facilitan su remoción evitando la incrustación de los equipos y las tuberías utilizadas en las etapas posteriores del proceso (Honig citado por Hamerski, 2009).

Durante el proceso de sulfitación, el sulfito de calcio y otras sales son formadas debido a la combinación de la cal con los ácidos orgánicos y otros componentes del jugo, entre ellos están las sales de fosfato (CaPO_4 - fosfato de calcio, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) que se precipitan y auxilian el proceso de clarificación, absorbiendo las partículas coloidales e impurezas coloreadas (Jourani & Bounahmidi, 1995).

La acción del dióxido de azufre no se resume solamente al rompimiento de la estabilidad coloidal del jugo y la precipitación de los coloides que encuentran su punto isoeléctrico en ese medio, el SO_2 tiene propiedad destornante, debido a su carácter reductor y preservativa, evitando el desarrollo de microorganismos perjudiciales al proceso, disminuyendo la viscosidad por precipitar ciertos coloides, mejorando la decantación y la calidad del jugo para el proceso de evaporación y la cocción, produciendo de esta forma mieles en pocas cantidades (Payne, 1989).

2.4. Carbonatación

La clarificación del jugo de caña de azúcar constituye una de las principales operaciones unitarias en la obtención del azúcar blanco. El método tradicional de este proceso es la sulfitación, técnica que emplea SO_2 gaseoso y cal. Sin embargo, ha presentado algunas restricciones en cuanto a su uso de orden tecnológico, operacional, ambiental y normas de seguridad alimentaria. En este sentido, la carbonatación es una alternativa viable para el proceso de clarificación siendo el estudio de sus variables importante y necesarios, (Hamerski, 2009).

La carbonatación es un proceso común en la clarificación del jugo de remolacha y fue introducido en la clarificación del jugo de caña, en Java, alrededor de 1880 según Rocha, (1987). En países como Inglaterra, Australia y Sudáfrica se emplea en la refinación de azúcares brutos (VIEIRA, 1982). Mientras que en Brasil no presenta aplicación a escala industrial. Este proceso consiste en añadir leche de cal y gas carbónico (CO_2) al jugo de caña bajo condiciones controladas, formando un precipitado cristalino o carbonato de calcio. Este, a su vez, adsorbe e incorpora gran parte de la materia coloidal e insoluble, no azúcares inorgánicos y las sustancias que confieren color al jugo. En consecuencia, el precipitado es separado del jugo aclarado por filtración (Moodley et al., 2003).

La técnica de la carbonatación puede ser conducida de diferentes maneras, entre ellas se destaca la doble carbonatación, la carbonatación del jugo intermedio y carbonatación continúa.

2.4.1. Principales reacciones

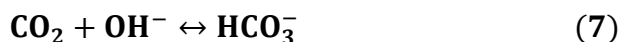
Las reacciones involucradas en el proceso de carbonatación que describen el principio de este método se presentan a continuación de acuerdo con Honig, (1953). Inicialmente, al añadir óxido de calcio (CaO), en forma de leche cal, los iones Ca^{++} y OH^- son disociados, de acuerdo con la ecuación 6, y se introducen en el jugo.

2.4.1.1. CO_2 y OH^-

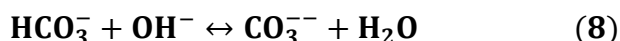
El CO_2 al ser un ácido débil, en el agua reacciona con las bases. Siendo de particular interés su reacción con el óxido de calcio o el hidróxido de calcio:



El dióxido de carbono al ser burbujado en el medio alcalinizado se absorbe con la formación del ion bicarbonato visualizado en la reacción (7).



En medio alcalino el ion bicarbonato se descompone en el ion carbonato, neutralizando el medio de acuerdo con la reacción (8).



En la secuencia de la reacción el precipitado carbonato de calcio se forma, de acuerdo con la reacción (9).



El carbonato de calcio precipita y elimina el calcio de las soluciones, con mayor adición de dióxido de carbono al medio.

Gran parte de los estudios existentes en la literatura, relacionados a la carbonatación, emplean este proceso en la refinación del azúcar en bruto, diferenciándose del objetivo de este estudio, que es el de evaluar el proceso de carbonatación del jugo de caña. En este sentido es posible comparar los dos procesos, ya que los mismos involucran la precipitación del carbonato de calcio. (Moodley et al. 2003).

Según Moodley et al. (2003), relatan que uno de los principales objetivos de la carbonatación es la remoción de impurezas aun presentes en el azúcar bruto que entra en la refinería. Algunas de las impurezas encontradas, como los polisacáridos, afectan la nucleación y el crecimiento de los cristales de sacarosa, además de influenciar de forma negativa el proceso de filtración.

2.4.2. Factores que influyen en la carbonatación.

2.4.2.1. Absorción de gas dióxido de carbono

La absorción de gas de dióxido de carbono se verá afectada por el diseño de los reactores, el brix, la temperatura y el pH de la masa fundida. En los reactores convencionales, la absorción de gas es aproximadamente del 35%, (Chapman, 1967). Se lograron eficiencias del 100% con el uso de mezcladores en línea (Hulpiau et al., 1978). El efecto de la temperatura sobre la absorción de gas es bien conocido, siendo la absorción de dióxido de carbono por el hidróxido de calcio mayor a temperaturas más altas. Aunque los gases son menos solubles a temperaturas altas, el aumento de la absorción con temperaturas altas se debe a la mayor velocidad de reacción. Frankland (1980,1981) investigó el efecto del pH del jugo carbonatado en la eficiencia de la absorción de dióxido de carbono durante la carbonatación tanto en el laboratorio como a gran escala en dos refinерías sudafricanas, los resultados de las dos refinерías se muestran en la Tabla 7.

Como se esperaba, el pH tiene un efecto marcado en la eficiencia del gaseado. En la región altamente alcalina se lograron altas eficiencias y, a medida que se redujeron los valores de pH, disminuyeron las eficiencias.

Tabla 7: Efecto del pH en la eficiencia del CO₂ en la clarificación del jugo de caña.

pH	Eficiencia del CO ₂ (%)	
	Eficiencia 1	Eficiencia 2
10.5	100	100
10	40	70
9.5	30	30
9	25	20
8.5	22	26

Fuente: (Frankland, 1981 citado por Moddley, 2001).

2.4.2.2. Temperatura

La temperatura tiene un efecto sobre la viscosidad del jugo y la calidad de la partícula precipitada de carbonato de calcio. El grado de conglomeración de carbonato de calcio aumenta con la temperatura hasta 82 °C (Bennet, 1974). El trabajo realizado por Murray & Runggas, (1975) ha demostrado que la temperatura óptima para la carbonatación en el laboratorio fue de 86 ° C. Bennet, (1990) recomienda una temperatura de 82 °C para la reacción de carbonatación. Uno de los factores que influye en la degradación alcalina de los azúcares reductores al ácido láctico es la temperatura, ya que para minimizar la formación de ácido láctico en la refinería de Huletts, la temperatura del encalado se redujo de 80 ° C a menos de 75 ° C (Cox et al., 1990).

2.4.2.3. Tiempo de reacción

El tiempo de retención del jugo de caña en el reactor influye en la eliminación de impurezas; Bennet (1990) recomienda una retención de 45 minutos en el primer reactor, mientras que Murray & Runggas, (1975) utilizaron un tiempo de retención de 1 hora para las pruebas de carbonatación en el laboratorio.

2.4.2.4. Brix

Cuanto más alto es el brix del jugo, mayor es la viscosidad, el cual tendría un efecto adverso en el rendimiento de los filtros, por lo tanto, influiría en la eliminación de impurezas, por otro lado, si el brix es demasiado bajo, entonces aumentaría el consumo de energía en los evaporadores de la refinería. (Murray & Runggas, 1975)

2.4.2.5. Calidad de cal

La calidad de la cal utilizada en la carbonatación influye en la filtrabilidad del jugo de caña carbonatado (Bennet, 1990). El "envejecimiento" (*tiempo de almacenamiento del hidróxido de calcio mediante agitación y su uso en el reactor*) de la leche de cal también es considerado importante por algunos trabajadores, siendo Murray & Runggas (1975) los que recomiendan un tiempo de "envejecimiento" de dos horas.

2.4.2.6. Cantidad de leche de cal

La cal (*agregada como una suspensión de hidróxido de calcio en agua*), generalmente expresada como %CaO, tiene un efecto sobre la decoloración y sobre la filtrabilidad del precipitado de carbonato de calcio formado. El grado de decoloración dependerá del color del azúcar entrante y de la cantidad de cal agregada. Más cal eliminará más color hasta que se alcance el nivel óptimo. La adición de 0,6% (masa / masa) de CaO eliminó entre 61 y 74% del color en la corriente de fusión según Bennet, (1974). En la figura 4 se muestra la adición de cal frente a la decoloración del licor, los resultados indican que hay una dosis óptima de cal. El trabajo realizado sobre el licor carbonatado en el Sugar Milling Research Institute Lionnet & Moodley, (1995) ha demostrado que la degradación alcalina de los azúcares reductores hizo que el color del licor aumentara de 971 NTU a 2031 NTU. Una refinería en Sudáfrica (Cox et al. ., 1990) había experimentado ganancias de ceniza más altas de lo normal. Una investigación realizada mostró que el calcio se solubilizó cuando reaccionó con ácido láctico para formar lactato de calcio que no se eliminó durante la carbonatación; se descubrió que la principal fuente de ácido láctico en la refinería era el resultado de la conversión química de los azúcares reductores en condiciones alcalinas durante el encalado.

Pruebas de laboratorio realizadas por Cox et al. (1990), mostraron que uno de los factores que influyeron en la degradación alcalina de los azúcares reductores a ácido láctico fue la cantidad de cal agregada, para minimizar la formación de ácido láctico en la refinería, la adición de cal se redujo de 0,7% a 0,6% de CaO.

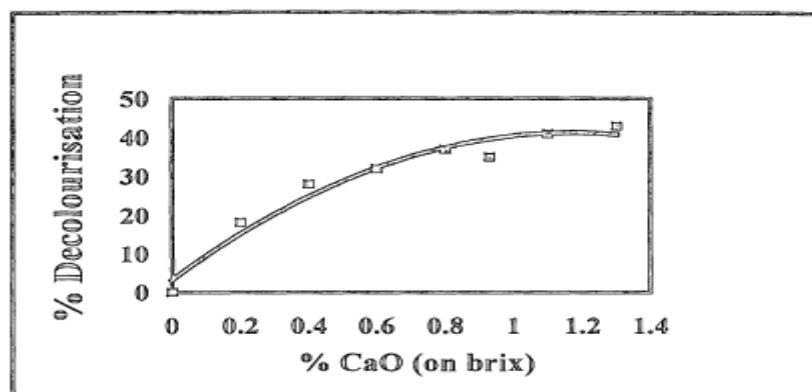


Figura 4: El efecto de la adición de CaO en la decoloración, Moodley (1992).

2.4.2.7.El efecto del pH final.

La eficiencia del proceso de carbonatación en la eliminación de impurezas depende del control del pH. La precipitación incompleta del calcio en el jugo de caña daría como resultado una filtración deficiente y un alto contenido de cenizas en el jugo de caña clarificado. Cuando se agrega exceso de dióxido de carbono, se produciría bicarbonato de calcio soluble que daría lugar a la liberación de las impurezas. (Murray & Runggas, 1975).

Para producir carbonato de calcio con buenas características de filtración, el pH debe ser entre 9,5 y 8,5 según Murray & Runggas, (1975). En el lado negativo a altos valores de pH, se produce la destrucción de azúcares reductores. La velocidad de destrucción de los azúcares reductores dependería de la temperatura y del tiempo de contacto. Según Kelly & cols, (1973), Realizaron pruebas de carbonatación por lotes, con diferentes tasas de adición de cal y se evaluó el efecto del pH final sobre la decoloración del jugo de caña durante la carbonatación. La cantidad requerida de leche de cal se agregó al jugo de caña y la reacción de carbonatación se inició burbujeando gas dióxido de carbono a través de la muestra; a medida que avanzaba la reacción, se retiraron submuestras del licor carbonatado a varios valores de pH. Las muestras fueron analizadas para el color. Según Kelly et al. (1973) la decoloración máxima durante la carbonatación ocurrió a valores de pH entre 9,2 a 9,4. (Yamane, 1954) realizó pruebas similares, durante el proceso de carbonatación se retiraron submuestras a varios valores de pH y se midió el color, los resultados mostraron que cuanto mayor es el pH final después de la carbonatación, mejor era la decoloración.

2.4.2.8.Adición de exceso de cal.

La adición de exceso de cal tendrá las siguientes desventajas:

- Más cal requiere más gas dióxido de carbono para su neutralización.
- Requiere potencia y energía adicionales.
- Se forma carbonato de calcio adicional que aumenta la resistencia del filtro.

- Debido a la torta de filtro adicional formada, se genera más agua dulce.
- La masa de la torta de filtro que se va a eliminar aumentará.
- La pérdida de azúcar en la torta del filtro aumentará.
- Habrá un aumento en los costos de los productos químicos de la refinería (costo del exceso de cal).

2.4.2.9. Adición de cal insuficiente-impurezas

El azúcar producido por un molino de azúcar en bruto tiene un pol de aproximadamente 99,3% (masa / masa) y un nivel de humedad de 0,10% (masa / masa) (Pillay, 1990). El brix del azúcar es, por lo tanto, de 99,9% (100-0,10) y su contenido no pol de 0,60% (99,9-99,3), este no-pol representa las impurezas en el azúcar y estas impurezas tendrán un efecto negativo en algunas de las operaciones unitarias. En primer lugar, ciertas impurezas tendrán un efecto profundo sobre la nucleación y el proceso de crecimiento o floculación (Alexander 1957; Murray et al., 1974) involucrados en la formación del conglomerado de carbonato de calcio, en segundo lugar, algunas impurezas afectarán los procesos de filtración (Lee y Donovan, 1995) en la refinería, en tercer lugar, la presencia de ciertas impurezas afectará negativamente el proceso de cristalización del azúcar (Morel du Boil, 1995) y, por último, la calidad del azúcar refinada (Clark y Legendre, 1996) se verá influenciada por algunas impurezas.

3. Materiales y métodos

3.1. Lugar De Ejecución

El proyecto se realizó en:

- Laboratorio de Análisis y Composición de Productos Agroindustriales de la EAPIA de la Universidad Nacional del Santa.
- Instituto de Investigación Tecnológica Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa.

3.2. Materia Prima E Insumos

3.2.1. Materia prima:

La materia prima que se utilizó en el trabajo de investigación fue la siguiente:

Jugo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*). Extraída de caña quemada luego de 8 horas después de cosechada. Caña de azúcar variedad México – 73 proveniente de la provincia de San Jacinto, Ancash - Perú.



Figura 5: Caña de azúcar quemada. Variedad México 73.

3.2.2. Gas carbónico

Se utilizó gas de dióxido de carbono acondicionado en su forma licuada, en cilindro de acero, tipo T, con capacidad de 75 kg. El CO₂ se obtuvo de Air products y su grado de clasificación es 4.5, con pureza mínima del 99,995% en la fase gaseosa.



Figura 6: Balón de CO₂ de 75 kg

3.2.3. Oxido de Calcio

En este trabajo, se utilizó óxido de calcio (CaO), reactivo PA, de la marca Nuclear. Conforme a las especificaciones del fabricante, la composición mínima es del 95%, el magnesio y las sales alcalinas están presentes en la proporción del 3,6% mientras que los insolubles en HCl representan un máximo del 1%.



Figura 7: oxido de calcio

3.2.4. Sistema para la carbonatación

Esquema del sistema experimental empleado en los ensayos de carbonatación, se diseñó de la siguiente manera.

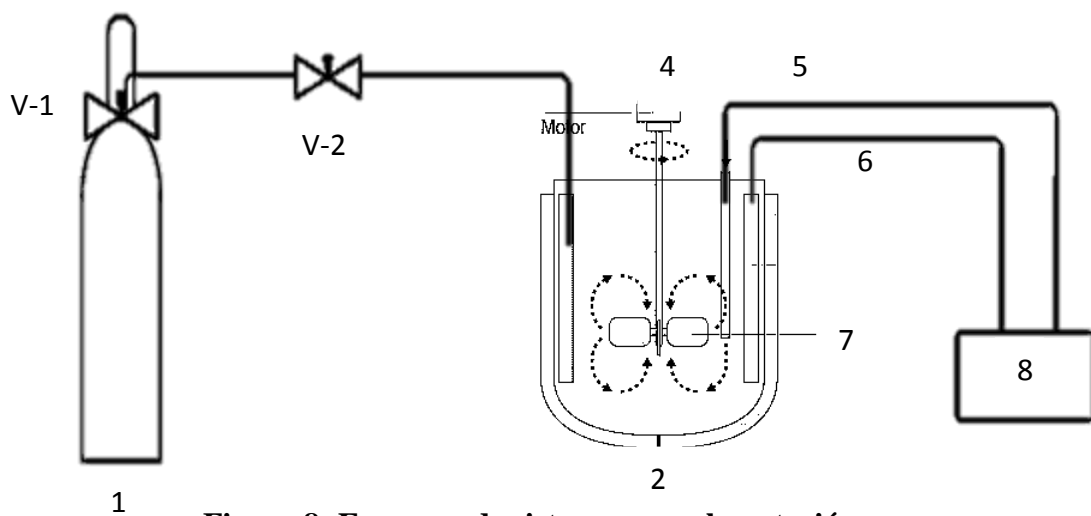


Figura 8: Esquema de sistema de carbonatación

Leyenda:

1- Cilindro de CO ₂ .	V-1 – Válvula reguladora de caudal para CO ₂ comprimido, modelo SR 312, con indicador de caudal y presión.
2- Birreactor	
3- Dispensador de gas	
4- Motor de agitación	
5- Electrodo de vidrio – sensor de pH	
6- Sensor de temperatura	V-2 - Válvula de aguja
7- Deflectores	
8- Computadora portátil	

3.2.5. Equipos

Los equipos utilizados fueron los siguientes.

- Agitador magnético: Thermolyne Nuova II Stirrer S18520 – 26
- Agitador de tubos: Barnstead Thermolyne M37615
- Autoclave: Tutnauer 5075ELV
- Balanza analítica: Prease Gravimetrics AG 221LX
- Balanza digital: Precisa LXZZDASC5
- Baño María: Brookfield TC- 550
- Biorreactor: Biotron LiflusGX
- Estufa eléctrica
- Espectrofotómetro: Unico 2800 UV/VIS
- pH-metro: Orion Star A211 Thermo Scientific
- Polarímetro: Sacarímetro Autopol 880
- Refrigerador
- Sonificador: Branson S800
- Trapiche

3.2.6. Materiales de Laboratorio

- Vasos de precipitado: 10, 50, 100 ml.
- Pipeteadores de plástico.
- Micropipetas: 10, 100 y 1000 uL.

- Fiolas de 10, 25, 50 y 100 ml.
- Tubos de vidrio y tubos falcón.
- Pipetas de 5 y 10 ml.
- Pinzas de madera y de metal.
- Papel filtro
- Viales

3.2.7. Otros Materiales

- Papel toalla
- Papel aluminio
- Marcadores.
- Plumón indeleble
- Grapas
- Cinta masqueting.

3.2.8. Reactivos

- Ácido 3.5 dinitrosalicílico (Sigma Aldrich)
- Hidróxido de sodio NaOH (Merck)
- Tartrato de Sodio Potasio tetra hidratado $C_4H_4KNaO_6 \cdot 4H_2O$ (Merck)
- Glucosa $C_6H_{12}O_6$
- Ácido clorhídrico
- Agua destilada
- Oxido de calcio

3.3.Métodos y análisis

3.3.1. Análisis y caracterización físico química proximal

3.3.1.1. Determinación de azúcares reductores - Método DNS

Para la determinación de azúcares reductores, se realizó por método de DNS (Miller, 1959), para ello primero se preparó el reactivo, la curva patrón (Anexo 1), y luego el desarrollo de la reacción para el análisis de las muestras.

3.3.1.2. Determinación de sacarosa (Manual Polarímetro Automático

Analytical Autopol I Rudolph Research– acoplado de NMX-F-271-1991):

Para dicha determinación de empleo el Polarímetro Automático Analytical Autopol I Rudolph Research. Este método se basa en la medición de la rotación del plano de luz polarizada al atravesar una solución de sacarosa, siendo la magnitud de este giro proporcional a la concentración de sacarosa en solución. El procedimiento se realizó acoplado la NMX-F-271-1991.

3.3.1.3. Determinación de Grados Brix

Para dicha determinación se empleó el refractómetro digital Rudolph Research J157. En la cual la medición es inmediata y directa, se acoplo según la NMX-F-436-SCFI-2011

3.3.1.4. Determinación de Turbidez

Procedimiento Preparación de la Muestra

Homogenizar la muestra de jugo, medir el Brix de la muestra original, preparar 50 mL de solución de 5 Brix, calcular la cantidad de material a ser utilizado: $\text{Volumen (Sol. 5 brix)} = 250 / \text{brix corregido de muestra original}$, llevar la cantidad calculada con la pipeta a la probeta y completar con agua hasta 50 mL. Transferir los 50 mL de solución a un vaso de precipitación. Homogenizar la solución.

Descripción del Método

Limpiar y secar el electrodo de un medidor de pH, correctamente calibrado y sumergirlo en la solución preparada, ajustar la solución a $\text{pH } 7.0 \pm 0.1$ añadiendo ácido clorhídrico 0.1 M o solución de hidróxido de sodio 0.1 M llevar a cero el refractómetro con agua destilada, con el gotero adicionar en la unidad óptica del refractómetro una porción de la solución neutralizada, esperar a que la lectura se estabilice, filtrar la solución neutralizada a través de la membrana de $0.45 \mu\text{m}$, considerar descartar los primeros 5 ml del filtrado, ajustar el espectrofotómetro a una longitud de onda de 420 nm, llenar la celda y ajustar a cero con agua destilada, llenar otra celda con la solución, considerar el enjuague de la celda cada vez que se mida otra solución y determinar la absorbancia de la solución sin filtrar y de la solución filtrada.

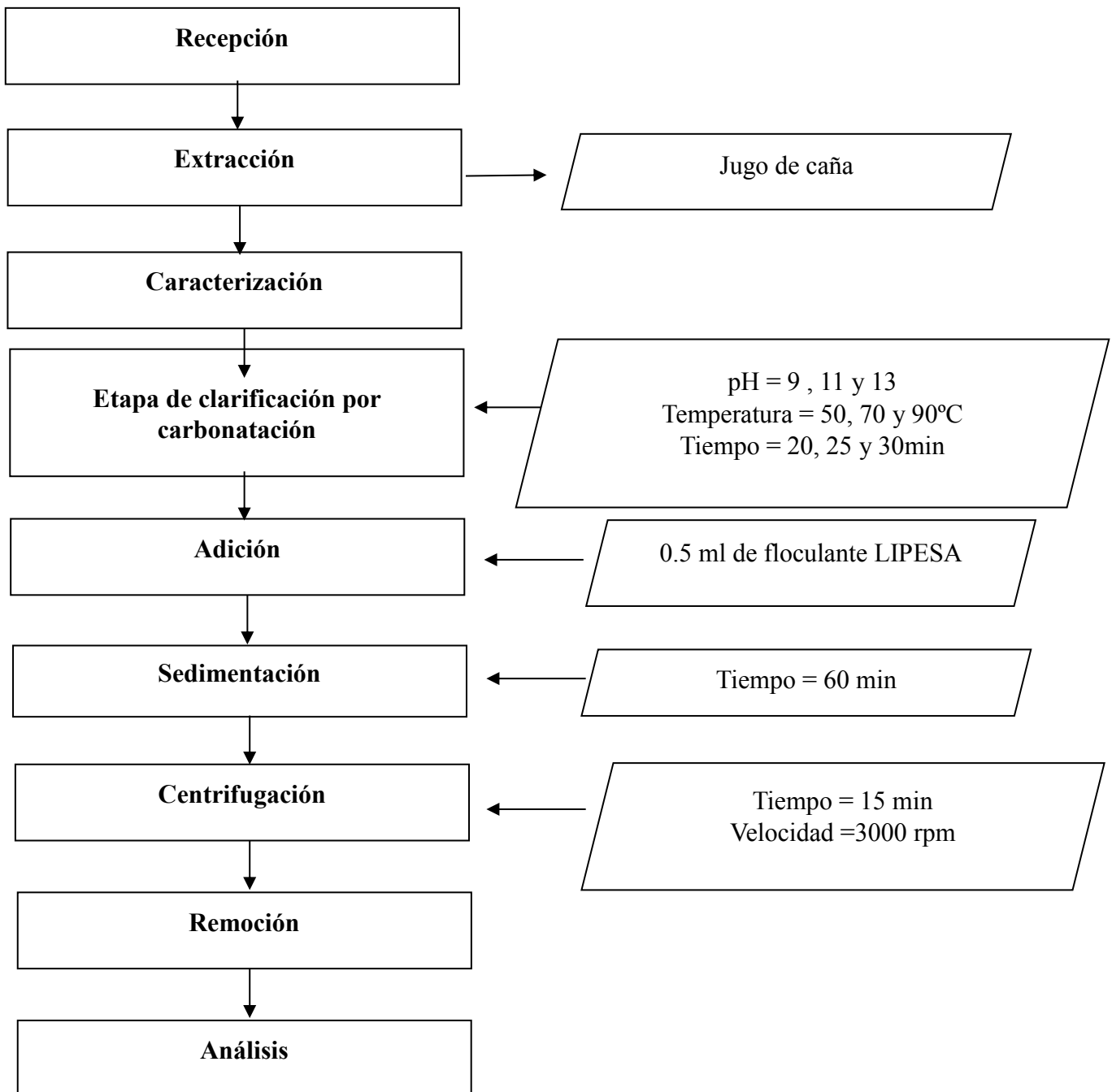
Se calcula el color expresado en unidades IU tanto para la muestra sin filtrar como para la muestra filtrada. La diferencia atribuye a turbidez y se reporta como la medida de turbidez relativa.

$$\text{Turbidez} = \text{Color (solución sin filtrar)} - \text{Color (solución filtrada)}$$

La turbidez se expresa en unidades ICUMSA (IU).

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(\text{turbidez jugo encalado} - \text{turbidez jugo claro}) \times 100}{\text{turbidez jugo encalado}}$$

3.4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL



3.4.1. Recepción de materia prima:

Se utilizaron cañas de azúcar cultivadas en el distrito de San Jacinto en la región Ancash variedad México – 73.

3.4.2. Extracción del jugo

La caña de azúcar fueron sometidas al proceso de extracción de jugo, luego de 8 horas de haber sido cosechada, mediante un trapiche de 4 mazas del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa.

Luego de la extracción del jugo de caña. El jugo fue sometido a temperaturas de congelación para así mantener sus características iniciales constantes.

3.4.3. Caracterización del jugo de caña

Luego de la extracción del jugo de caña se realizó la caracterización la cual se efectuó analizando los °Brix, sacarosa, azúcares reductores y turbidez.

3.4.3.1. Determinación de °Brix

- Se calibro el refractómetro digital con agua destilada, llevándolo a 0°Brix.
- Se tomó aproximadamente 2 ml de la muestra.
- Se tomó una gota de la muestra y se colocó en el lente del refractómetro.
- Se esperó la estabilización de la lectura y se tomó la medida de los °Brix, se anotó la lectura observada (esta lectura se registra directamente, ya que el refractómetro digital no necesita corrección en los resultados de °Brix). Se realizó por duplicado y se reportó el promedio.

3.4.3.2.Determinación de pol (sacarosa)

- Se taro en un vaso de precipitado de 100 ml seco y se pesó 26 g \pm 0.1 mg de la muestra, luego se aforo con agua destilada manteniendo a 293 \pm 1 K(20 \pm 1°C).
- Se filtró la muestra empleando papel filtro.
- Se lavó el tubo de polarización, enjuagándolo de dos a tres veces con dos tercios del volumen de la muestra filtrada.
- Se llenó el tubo con la solución azucarada estando la temperatura cercana a 20°C, en el canal del polarímetro.
- Se realizó por duplicado, y se reportó el promedio.

3.4.3.3.Determinación de azúcares reductores (DNS). (Anexo 1)

- Se tomó 0.5 ml de la muestra, se colocó en tubos de ensayo y se agregaron 0.5 ml del reactivo DNS.
- Los tubos fueron calentados en ebullición durante 5 min.
- Posteriormente, se frenó la reacción con hielo.
- Se adicione 5 ml de agua destilada, se dejó reposar por 15 minutos, procurando que a los 12 minutos se llevó al agitador.
- Se realizó la lectura de la absorbancia a 540 nm, utilizando agua + reactivo DNS, como blanco.
- La concentración se obtuvo interceptando la medida de absorbancia en la curva de calibrado. Se realizó por duplicado y se reportó el promedio.

3.4.3.4.Determinación de turbidez.

- Luego de centrifugar el jugo ya clarificado se toma 12 ml y se añade a los viales.
- Los viales son limpiados en el exterior por una franela.
- Se coloca dentro del equipo.
- Y se lectura la turbidez.

3.4.4. Etapa de clarificación por carbonatación

El jugo de caña extraído, fue diluido con agua destilada hasta llegar a un °Brix de 8, para hacer que el punto de partida sea el mismo, por otro lado los valores de sacarosa, turbidez, azúcares reductores del experimento serán distintos, luego fue añadido al birreactor en un volumen de trabajo de 1.5 litros.

Se ajustó la temperatura según cada experimento presentado en la Tabla 9, luego se añadió lentamente la leche de cal en el jugo hasta alcanzar el valor de pH preestablecido según cada experimento al igual que la temperatura, presentados en la Tabla 9, observándose, en esta etapa, la formación de los primeros precipitados. A continuación, la válvula aguja (V-1) fue parcialmente abierta, para que el flujo de salida del gas fuera la misma previamente ajustada por la válvula reguladora de flujo (V-2) y establecida para 2 LPM. Se accionó el cronómetro para contar el tiempo de la reacción y se pasó a añadir concomitante la leche de cal y CO₂; el pH tendió a disminuir luego de unos minutos gracias a que el CO₂ es un ácido, hasta mantenerse constante a un pH 6.8 el resto del tiempo de la reacción. Uno de los cuidados que se tuvo con la leche de cal es evitar que se produce separación de fases, para ello, la solución se mantiene bajo constante agitación.

3.4.5. Final de reacción

Después del tiempo de la reacción: 20, 25 y 30 minutos, se pasa a añadir el floculante.

3.4.6. Adición del floculante

Con ayuda de una pipeta se añadió 0.5 mL del floculante en 100 ml de jugo clarificado, preparado anteriormente en una concentración de 2 ppm.

3.4.7. Sedimentación

Se homogeneizó el jugo tratado con un bastón de vidrio, se retiró del

birreactor permaneciendo en temperatura ambiente, durante 60 minutos, para garantizar la sedimentación de todos los precipitados formados.

3.4.8. Centrifugación

El jugo tratado fue centrifugado a una velocidad de 3000 rpm por un tiempo de 15 minutos

3.4.9. Remoción de jugo clarificado

Después del tiempo de sedimentación, con el auxilio de una pipeta, se retiró el jugo aclarado y se realizaron los análisis físico-químicos.

3.4.10. Análisis

Una vez realizada el proceso, se tomará muestras del jugo aclarado para realizarle análisis de: sólidos solubles (°Brix), azúcares reductores, sacarosa y turbidez.

3.4.10.1. Determinación de sólidos solubles (°Brix)

Para la determinación de grados brix del jugo de caña de azúcar, se realizó con el ítem 3.4.3.1.

3.4.10.2. Determinación de pol (sacarosa).

Para la determinación de grados brix del jugo de caña de azúcar, se realizó con el ítem 3.4.3.2.

3.4.10.3. Determinación de azúcares reductores (DNS).

Para la determinación de grados brix del jugo de caña de azúcar, se realizó con el ítem 3.4.3.3.

3.4.10.4. Determinación de turbidez.

Para la determinación de grados brix del jugo de caña de azúcar, se realizó con el ítem 3.4.3.4.

3.5. TÉCNICA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para el delineamiento experimental de este trabajo, se utilizó la planificación factorial. La planificación factorial permite combinación de todas las variables independientes (factores) en todos los niveles, obteniéndose así un análisis de una variable sujeta a todas las combinaciones. De esta manera, es posible medir los efectos (o influencias) de una o más variables en la respuesta de un proceso.

En este estudio, se evaluaron tres factores (pH, tiempo y temperatura) en dos niveles de variación indicados por (-1) al nivel inferior y (+1) al nivel más alto. También, está incluido en el delineamiento un nivel cero (0), punto central intermedio, para la verificación de la curvatura (no linealidad) en el intervalo y repetición (intervalo de confianza).

En la tabla 8 se presentan las variables dependientes e independientes explorados en este estudio.

Las actividades se dividen en 27 tratamientos con repeticiones, haciendo un total de 54 corridas.

- El número de factores experimentales: 3
- El número de respuestas: 3
- El número de corridas: 27

Tabla 8: Variables independientes y región experimental.

VARIABLE	NIVEL (-1)	NIVEL (0)	NIVEL (+1)
pH	9	11	13
Tiempo (min)	20	25	30
Temperatura (°C)	50	70	90

La matriz de Planificación Experimental Factorial fue obtenida a partir del programa computacional STATGRAPHICS Centurion XVI, el Experimental

Design - DOE, (3^{**} (k-p)) y se presenta en la TABLA N° 9. La planificación factorial es completa ($p = 0$) compuesto de 3^k experimentos, siendo, $k = 3$ (variables), que totalizan 27 experimentos y por duplicado serian 54 experimentos en total.

Tabla 9: Matriz de planeamiento experimental factorial completo (3^k).

N° De Experimentos	pH	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Solidos Solubles (°Brix)	Sacarosa (°S)	Azucares Reductores (g/l)	Turbidez (NTU)
1	9	20	50				
2	9	20	70				
3	9	20	90				
4	9	25	50				
5	9	25	70				
6	9	25	90				
7	9	30	50				
8	9	30	70				
9	9	30	90				
10	11	20	50				
11	11	20	70				
12	11	20	90				
13	11	25	50				
14	11	25	70				
15	11	25	90				
16	11	30	50				
17	11	30	70				
18	11	30	90				
19	13	20	50				
20	13	20	70				
21	13	20	90				
22	13	25	50				
23	13	25	70				
24	13	25	90				
25	13	30	50				
26	13	30	70				
27	13	30	90				

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. PRUEBAS PRELIMINARES

Los resultados de las pruebas preliminares definieron las condiciones de trabajo en clarificación del caldo de caña por carbonatación. Inicialmente, la reacción fue realizada con ayuda de un agitador mecánico, se observaba la formación de precipitados, sin embargo, la sedimentación de éstos no ocurría o era muy lenta.

Para mejorar la eficiencia de la sedimentación, al final de cada experiencia de clarificación, se pasó a añadir 0.5 ml de floculante en 100 ml de jugo clarificado, en una concentración de 2 ppm de un polielectrolito aniónico Lipesa; Según Hamerski, (2009). Se verificó la actuación del floculante, por la sedimentación de la mayoría de los copos que ocurría en un tiempo máximo de 20 minutos. Sin embargo, pequeños precipitados permanecían dispersos en el caldo contribuyendo a mayores tasas de turbidez e influenciando en los resultados de los análisis, basados en la lectura de absorbancia. De esta forma se optó por separar los sólidos del jugo clarificado por el método de centrifugación; el jugo clarificado se centrifugo a una velocidad de 3000 rpm a una temperatura de 25 °C, para evitar interferencia de los pequeños precipitados en los análisis. A pesar de que el problema analítico puede resolverse con la centrifugación del jugo, el proceso de clarificación no era adecuado.

Una de las hipótesis consideradas para la no sedimentación de los pequeños cristales fueron el hecho de que la agitación, aplicada a la homogeneización del medio, aumentó la viscosidad del caldo y por consecuencia, la sedimentación de los pequeños precipitados se habían dificultado. Para ello, se retiró la agitación del proceso y se verificó la ausencia de los pequeños precipitados dispersos, y la sedimentación prácticamente instantánea.

Las pruebas para definir el caudal de CO₂, también se realizaron a las condiciones operativas de este estudio ya que a más flujo de CO₂ mas interferencias teníamos con el pH ya que al ser un ácido débil, lograba

disminuir el pH del medio hasta 6.8, con esto y Según FAVERO, (2011), HAMERSKI, (2009) los cuales hicieron el estudio del caudal óptimo de CO₂ se estableció un caudal de 2 LPM (litros por minuto).

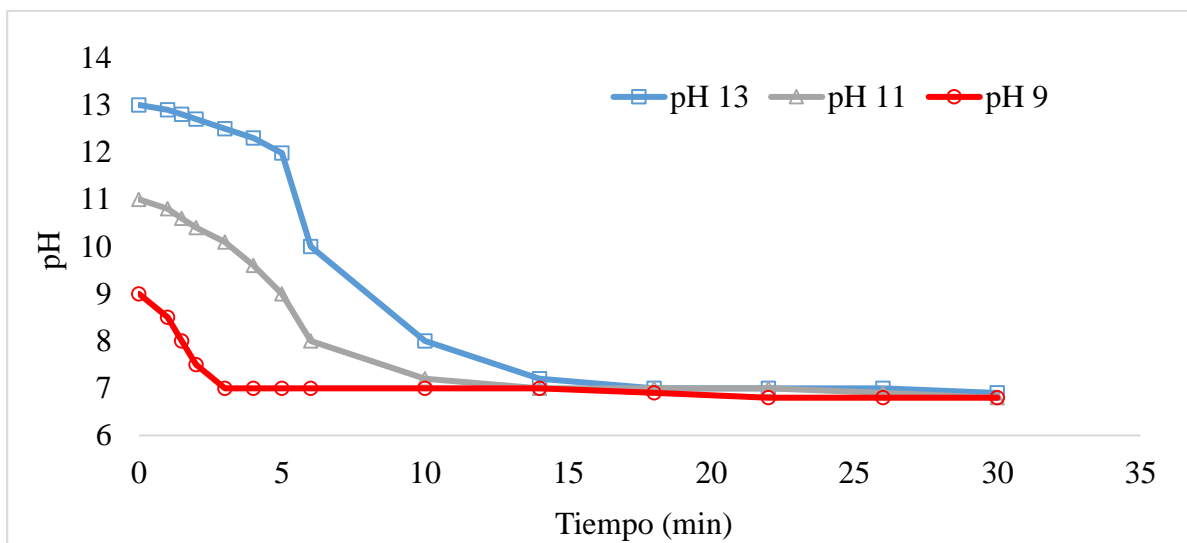


Grafico 1: Variación del pH del medio a un flujo constante de CO₂ (2Lpm) durante la clarificación.

Pero aun luego de hacer el ajuste del flujo de CO₂, el pH aún seguía disminuyendo, para evitar inconvenientes, se decidió trabajar a pH 9, 11 y 13 iniciales y observar el comportamiento de solidos solubles (°Brix), azucares reductores, sacarosa y turbidez hasta que el pH del medio disminuya y se mantenga constante a pH 6.8, como se muestra en grafico 9.

La temperatura a trabajar fue de 50, 70 y 90 °C, los cuales se tomaron de la investigación de HAMERSKI, (2009), el cual verificó el efecto de las variables a pH de 6.5, 8 y 9; en tiempos de reacción entre 20, 40 y 60 minutos y temperaturas de 60, 70 y 80 ° C, en el proceso de clarificación del caldo de caña utilizando el gas carbónico y el óxido de calcio como reactivos, concluyendo así que la asociación entre pH elevado de 9.5, tiempo de reacción de 60 minutos y temperatura de 80 ° C, dieron los mejores resultados.

Los valores de pH 9, 11 y 13 a estudiar se consideraron después de estudios de trabajos anteriores en la literatura, como los de Hamerski (2009); Moodley et al. (2003); FAVERO, 2011 y Aoki y Tavares (1986).

4.2. Caracterización fisicoquímica del jugo de caña de azúcar

A continuación, se muestra en la tabla 10 las características promedio del jugo de caña mezclado que se utilizó para la investigación. Dentro de las características más importantes del jugo mezclado se analizó los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix), sacarosa, azúcares reductores y turbidez.

Tabla 10: Caracterización fisicoquímica del jugo de caña de azúcar

Características fisicoquímicas	Sólidos Solubles ($^{\circ}$Brix)	Sacarosa ($^{\circ}$S)	Azúcares Reductores (g/l)	Turbidez (NTU)
Resultados	16 ± 0.3	60.8 ± 0.8	0.73 ± 0.2	1830 ± 7.1

El resultado obtenido en la caracterización físico – química del jugo de variedad México -73 proveniente de Nepeña – San Jacinto da un valor de 16 $^{\circ}$ Brix, el cual es el promedio de las muestras con mayor y menor contenido de $^{\circ}$ Brix las cuales fueron obtenidas de las muestras M₁ con 18 y M₂ con 15 $^{\circ}$ Brix, el cual concuerda con los resultados de Ramírez et al., (2014) el cual indica que los grados Brix del jugo de caña de azúcar de variedad R-73 normalmente fluctúan entre 16 y 24 $^{\circ}$ Brix. En contraste con Osorio (2007), citado por Benítez y Guagalango (2011), quienes indican que los valores promedio de los $^{\circ}$ Brix, varían fuera de los rangos aceptables debido a la concentración de los sólidos solubles en el jugo de caña debido a su madurez fisiológica y épocas de lluvia entre (17 – 19) $^{\circ}$ Brix; así también, (JOSELO & MORÁN, 2016). Determinan que los $^{\circ}$ Brix varían en épocas secas de (19 – 22) $^{\circ}$ Brix.

Con respecto a la sacarosa, se obtuvo un contenido de 60.8 $^{\circ}$ S de sacarosa equivalente a 14,87 Pol teniendo referente a lo observado por Ragnar en sus resultados que nos muestra un valor de Pol entre 14,76 a 18,88 como valor óptimo. Los resultados al mismo tiempo concuerda con lo indicado por Castillo, (2015), el cual da como resultado un contenido de 62.5 $^{\circ}$ S; a diferencia de Sotelo, (2018) que menciona un resultado distinto dando un

valor de 16.50 de Pol teniendo un contenido de 67.46 °S, este valor es una medida estrechamente relacionada con la concentración de sacarosa presente, y aunque se trata de un parámetro muy usado en la industria azucarera, su valor puede estar influenciado por otras sustancias presentes que tengan la propiedad de rotar la luz polarizada. (Cenicaña 8592 parte inferior con 19,81).

Por el lado de azúcares reductores da un resultado de 0.73 g/l, el cual no concuerda con los resultados mostrados por Sotelo, (2018) la cual muestra resultados de 0.23 g/l de azúcares reductores, a diferencia de Escudero, (2016), que obtiene como resultado 0.5 g/l de azúcares reductores, esta diferencia puede existir ya que Sotelo y Escudero realizaron sus análisis en el Espectrofotómetro UV/VIS: Genesys 20 Thermo Scientific a diferencia de esta investigación que se realizó en el equipo Hybrid Multi-Mode Microplate Reader: Biotek Synergy H1.

El valor de turbidez para esta investigación fue de 1830 NTU, a diferencia (Hamerski, 2010) nos da un valor de 353 NTU, dada la diferencia es gracias al equipo utilizado por Hamerski, realizó por turbidímetro de banco micro procesado (DLM-2000B) con capacidad de lectura de 0 a 1000 NTU a diferencia de esta investigación que se realizó en el equipo ORION AQ4500.

4.3. Cinética de reacción de los °Brix, sacarosa, azúcares reductores y turbidez en el jugo de caña

Las siguientes gráficas son resultado de los 27 experiencias con su duplicado (anexo 2), en las cuales se observa que la variable independiente (tiempo), no muestra ningún efecto sobre las variables respuesta, siendo así, se optó por trabajar a un tiempo de 30 minutos, y así observar la influencia del pH y la temperatura, los gráficos a continuación son resultado de los promedios de las tablas ubicadas en el anexo 2.

4.3.1. Cinética de reacción de los °Brix en la clarificación del jugo de caña.

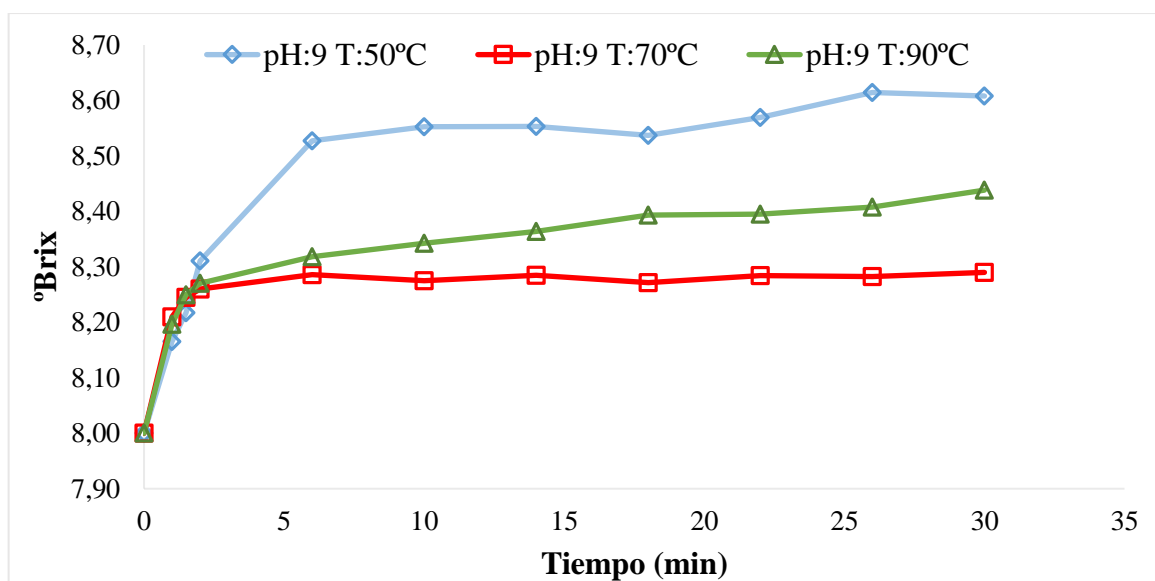


Grafico 2: Cinética de reacción de °Brix en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 9 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

El gráfico 2, 3 y 4 presenta la tendencia en respuesta para los °Brix, en relación a la interacción entre el pH y la temperatura, iniciando a un pH 9, 11 y 13, a temperaturas de 50, 70 y 90 °C, en la gráfica 1, el experimento se inicia con un pH 9, luego de 1 minuto el pH disminuye hasta llegar a 6.8, por efecto del CO₂ y la temperatura, manteniéndose constante en dicho pH por 29 minutos durante la clarificación, siendo el tiempo total de clarificación 30 minutos.

El mejor resultado de °Brix se muestra a una temperatura de 50 °C, teniendo un rango de 8 a 8.57 °Brix, mostrando valores positivos, al igual que a temperatura de 70 °C, en la cual se obtuvo un ligero aumento de 8 a 8.28 °Brix, lo cual permite verificar la tendencia de las respuestas convergiendo para mayores valores de °Brix en menores valores de temperatura de 50 °C; y obteniendo menores valores de °Brix a mayor temperatura de 70 y 90 °C.

El factor que tiene un mayor efecto significativo, sobre el contenido de °Brix, es el pH, y tiene influencia en el sentido de reducirlo, es decir, diluir el caldo por el volumen agregado de lechada de cal (hidróxido de calcio), el cual fue de 40 ml de lechada de cal, la temperatura tiene efecto positivo, pues, eleva la concentración de los °Brix en el jugo de caña, por lo tanto, se obtiene el mayor valor de °Brix, siendo demostrado por Hamerski, (2011) quien menciona que la clarificación del jugo de

caña de azúcar en pH más bajo de 7 a 9 y temperaturas más altas converge en el sentido de los mayores valores de °Brix, mientras que, en condiciones de pH mayores de 10, se obtienen los menores contenidos de °Brix. En este caso, se evidencia que el efecto de la temperatura, en concentrar el medio, es inferior al efecto de la dilución, provocado por el volumen de cal hidratada agregado al birreactor.

La carbonatación efectuada a pH menores de 9 requiere pequeñas cantidades de lechada de cal para mantenerlo constante durante la reacción. Pues, el CO₂, al ser absorbido por la agua del jugo de caña de azúcar, y después de algunas secuencias de reacciones, libera pequeñas cantidades de iones H⁺, acidificando el medio sensiblemente. Los iones OH⁻ de la cal hidratada, añadida en pequeñas cantidades, neutralizan el medio, y entonces, no se requiere gran cantidad de gas para que ocurra de nuevo la variación el valor del pH y, por consiguiente, exija el empleo de cal. (FAVERO, 2011).

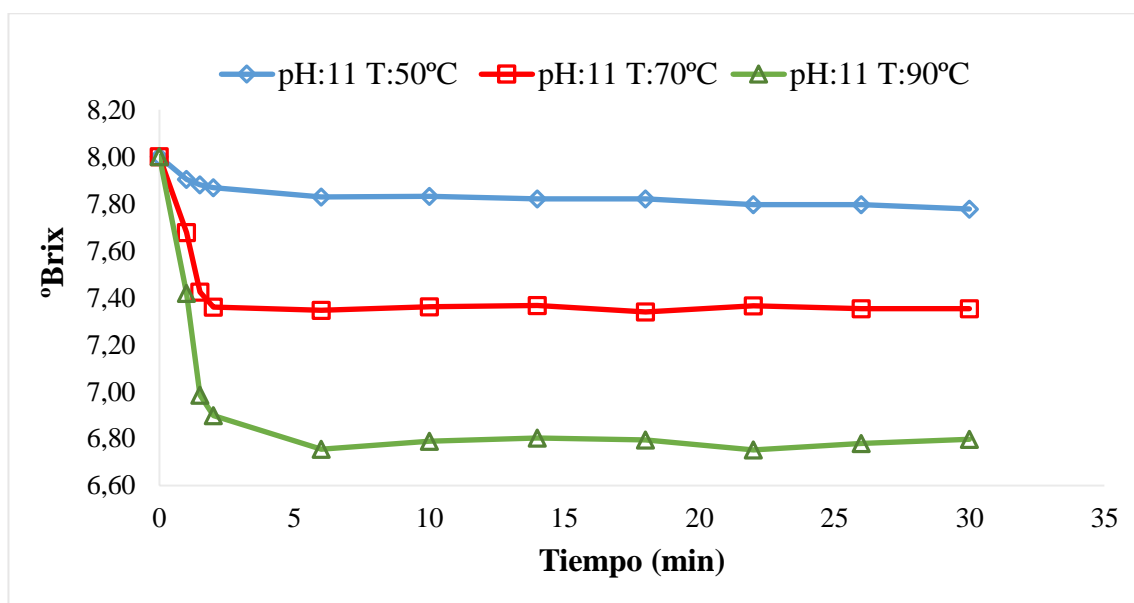


Grafico 3: Cinética de reacción de °Brix en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 11 y Temperatura de 50, 70 y 90°C.

El grafico 3 presenta una tendencia en respuesta para los °Brix, en relación a la interacción entre el pH y la temperatura, iniciando a un pH 11 y variando la temperatura de 50, 70 y 90 °C, el experimento se inicia con un pH 11, luego de 3 minutos el pH disminuyo hasta llegar a 6.8, por efecto del CO₂ y la temperatura, manteniéndose constante en dicho pH por 27 minutos durante la clarificación, siendo el tiempo total de clarificación 30 minutos.

En las reacciones procesadas a pH mayores de 9, una cantidad de lechada cal debe ser añadida para llegar al pH requerido, teniendo esto en mente, el grafico 2 que fue discutido tuvo un pH 9 en la cual tuvo que agregarse 40 ml de lechada de cal (oxido de calcio hidratado) para llegar al pH requerido, en comparación con el grafico 3, para llegar a pH 11 se tuvo que agregar 100 ml de lechada de cal, teniendo una dilución mayor, esto se ve reflejado en los resultados ya que a pH 11 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C los °Brix tienden a disminuir de 8 a 7.81, 7.35 y 6.78 °Brix respectivamente, mostrándose estos resultados en los primeros 2 minutos luego de haber iniciado el proceso de clarificación, en comparación al grafico 1 en donde a pH 9 los °Brix aumentaron exponencialmente hasta los primeros 5 minutos de haber iniciado el proceso de clarificación, para luego mantenerse constante.

Teniendo en cuenta lo mencionado se logra demostrar que el medio se ve alterado con facilidad por los iones H^+ , liberados en la reacción entre el gas carbónico y el jugo de caña, el cual exigirá un mayor volumen de lechada de cal mientras mayor sea el pH requerido, por consiguiente, darán como resultado jugos con menores contenidos de °Brix. (Hamerski, 2011).

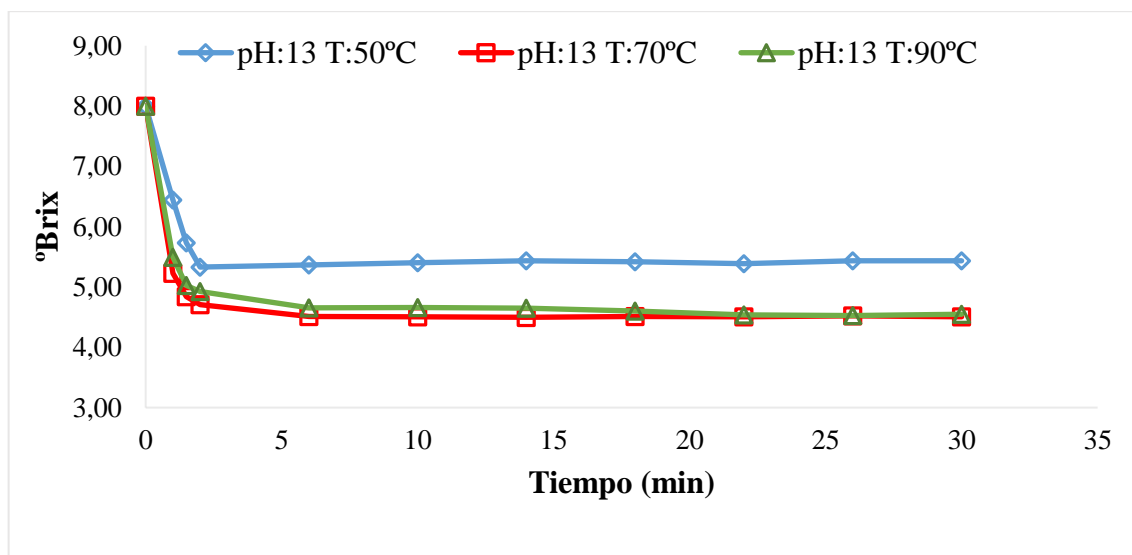


Grafico 4: Cinética de reacción de °Brix en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 13 y Temperatura de 50, 70 y 90°C.

El grafico 4 presenta una tendencia en respuesta para los °Brix, en relación a la interacción entre el pH y la temperatura, iniciando a un pH 13 y variando la temperatura de 50, 70 y 90 °C, el experimento se inicia con un pH 13, luego de 7

minutos el pH disminuyo hasta llegar a 6.8, por efecto del CO₂ y la temperatura, manteniéndose constante en dicho pH por 23 minutos durante la clarificación, el cual se puede visualizar en la gráfica 1, siendo el tiempo total de clarificación 30 minutos.

En el grafico 4, nos muestra que mientras aumente el pH los °Brix tenderán a disminuir, como lo podemos observar en el experimento de pH 13 y 90°C, los °Brix disminuyen de 8 a 4.60, esto es fácilmente explicable, ya que cuanto mayor sea el pH o el caudal de CO₂ mayor será la cantidad de solución de lechada de cal agregada para mantener el pH en el valor deseado, diluyendo así el caldo y reduciendo el valor de los °Brix

Los resultados mostrados a pH 13 en contraste con los resultados mostrados en los gráficos 2 y 3 en donde se trabajó a pH 9 y 11 respectivamente, muestra una tendencia negativa mucho mayor que el grafico 4, esto es debido a que el pH aumento y tuvo que agregarse 500 ml de lechada de cal para poder llegar al pH requerido, Hamerski, (2011) menciona que el contenido de °Brix, cuanto mayor el pH de la reacción, menor es el porcentaje de °Brix en el juego de caña aclarado. La mayor o menor dilución, ocurrida en el jugo de caña tratado, se debe al hecho de que el consumo de cal en cada uno de los tratamientos es diferenciado y depende de la solubilidad del CO₂ en el medio, favorecida en pH alcalino. Los mayores volúmenes de cal, empleados en la clarificación del caldo, llevaron a las mayores diluciones, ya que el estudio fue realizado utilizando lechada de cal.

4.3.2. Cinética de reacción de sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

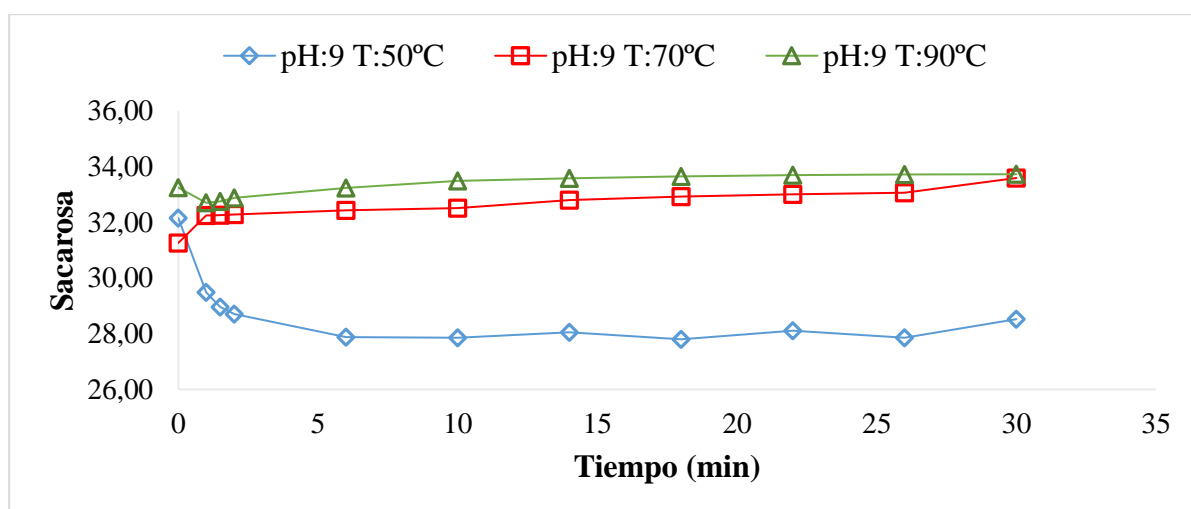


Gráfico 5: Cinética de reacción de Sacarosa en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 9 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

La sacarosa, bajo la influencia de las variables pH y la temperatura, presentaron tendencias diferenciadas a 50 °C. En la figura , las temperaturas de 70 y 90 °C a valores de pH de 9 muestran mayores valores de sacarosa; al iniciar las cinéticas en el proceso de clarificación el pH de los medios es 9, en estas condiciones la sacarosa tiende a disminuir para la cinética de 50 °C donde la enzima invertasa a esta temperatura y pH no logra inactivarse, a partir del minuto 1 el pH disminuye hasta un pH de 6.8 donde la pérdida de sacarosa se mantiene constante hasta los 30 minutos de reacción, a estas condiciones de pH y a 50°C la enzima invertasa actúa degradando la sacarosa a glucosa y fructosa, en contraste con las cinéticas de mayores temperaturas de 70 y 90 °C permiten que la enzima invertasa se inactiven, esto es sustentado por (Peraça Toralles, Rafael Kuhn, Silva de Sá, & Augusto Ruiz, 2014); así también sustentan que otra forma de degradar la sacarosa es acidificando el medio y para evitar la inversión ácida se inhibe mediante la elevación del pH por encima de 7,0.

En las 3 cinéticas de reacción, se agrega el CO₂ como elemento principal para la etapa de clarificación, cumpliendo la función de formar carbonato de calcio junto con el óxido de calcio para disminuir la turbidez, provocando así la acidificación del medio a un pH de 6.8 (Moodley, 2001)

Las cinéticas de reacción a temperaturas de 70 y 90 °C a pH 9, muestran incremento en sacarosa, debido a la influencia de la temperatura, el incremento concentra el medio, influenciando en la degradación estructura de la sacarosa levemente, esto se demuestra con la cuantificación de los azúcares reductores por el método de DNS, en contraste de Marignetti Y Mantovani, (1979/80), citado por Priscilla Podadera, (2007), menciona que para la producción de un azúcar con un 80 a 95% de inversión de sacarosa el rango de temperatura debe estar entre 70 a 80 ° C y mantenido en medio ácido por un período de tiempo mayor que 2 horas; con esto se demuestra que se requiere de pH menores a 7 y tiempos prolongados mayores de 30 minutos para producir la inversión de la sacarosa a más de 80%, afianzando con PALMA, (2014), que demuestra que a los 30 minutos la sacarosa debe estar invertido en un 30 % a una temperatura de 75 °C y en un medio ácido; de los ensayos experimentales mostrados se determina que a un pH de 9 y a temperaturas de 70 y 90°C se incrementa la sacarosa (grafico 5).

La disminución de la sacarosa a pH 9 y 50 °C; es ocasionada por el leve medio ácido influenciado por el CO₂ y la temperatura, en donde tanto la enzima invertasa y la temperatura influyen en la estructura del disacárido (sacarosa) rompiendo el enlace α - 1,2 glucosídico, el cual une a los monosacáridos α -D-glucosa y el monosacárido β -D-fructosa, dando como resultado los azúcares reductores como glucosa y fructosa, esto es demostrado por (Ribeiro, 2009) en su investigación Estudio da hidrólise de carboidratos em meio neutro, utilizando uma mistura de ésteres derivados de óleo de mamona.

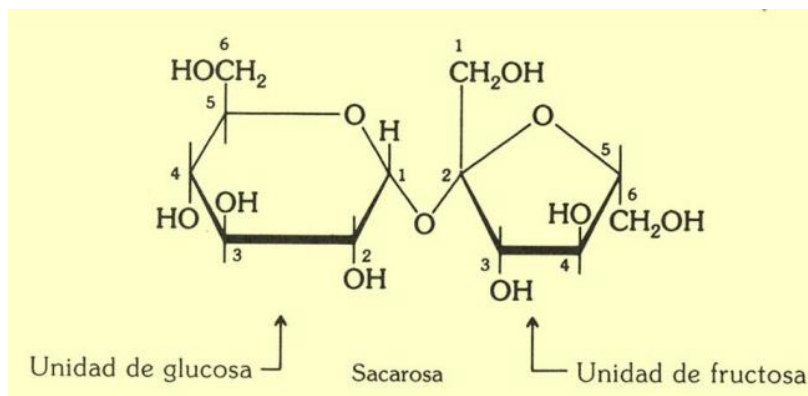


Figura 9: La sacarosa compuesta por 2 unidades de monosacáridos de α -D-glucosa y 1 molécula de β -D-fructosa unidas por el enlace α -1,2 glucosídico.

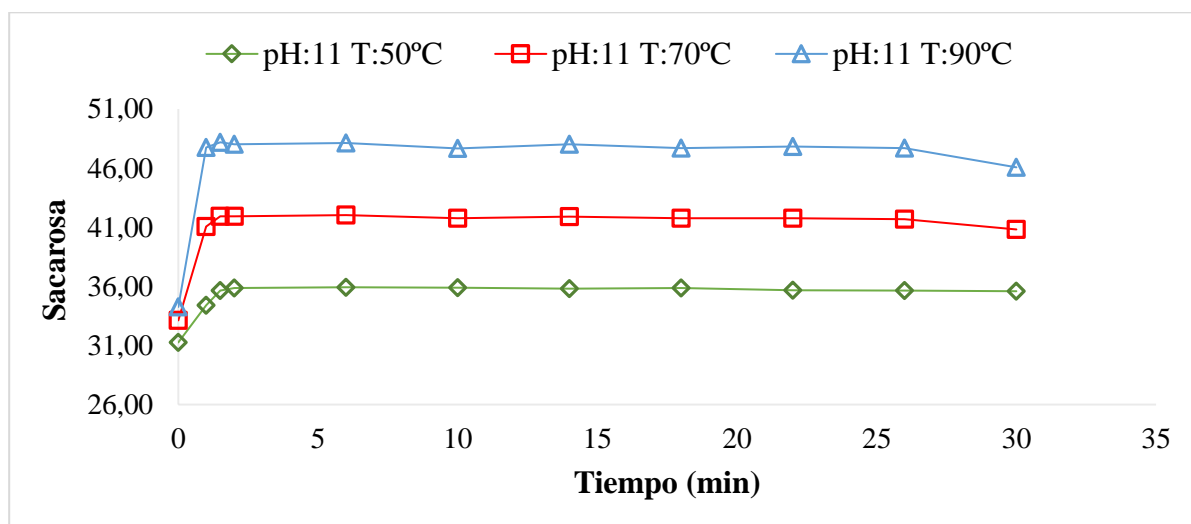


Gráfico 6: Cinética de reacción de Sacarosa en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 11 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

El gráfico 6 muestra que el rango de sacarosa a pH de 11 es mayor que en el gráfico 5 de sacarosa de pH 9; mostrando la influencia del pH.

En la cinética a pH 9 y temperatura de 50 °C, la sacarosa disminuye debido a los efectos del medio ácido, enzima invertasa y temperatura, en el gráfico 6 no se observa el mismo comportamiento para las cinéticas a pH de 11 demostrando que el pH tiene influencia en la hidrólisis de la sacarosa en medio ácido mas no en medio alcalino. Las cinéticas a pH 11 y temperatura de 50,70 y 90°C presentan la misma tendencia, pero el rango de conservación de sacarosa presenta una gradiente [31.26 - 35.77]°S, [33.12 - 35.741.67]°S y [34.26 - 47.58]°S respectivamente de sacarosa; esto es debido a que el enlace glucosídico que une a la glucosa y fructosa es más estable a pH alcalino, a la vez el CO₂ actúa mejor a condiciones de pH alcalino, ayudando a precipitar a los sólidos insolubles, por otro lado la temperatura tiene un efecto positivo a pH de 11 ya que a mayor es la temperatura mayor es el contenido de sacarosa en el jugo de caña clarificado.

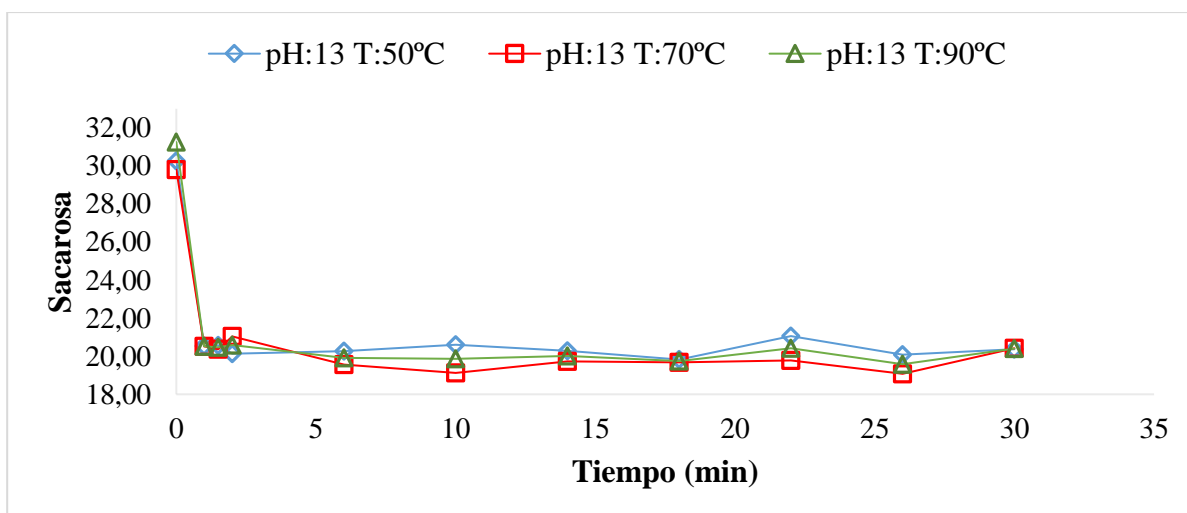


Gráfico 7: Cinética de reacción de Sacarosa en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 13 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C

Las cinéticas de reacción a pH de 9 tiene un rango de sacarosa de 33.58 a 28.01 °S, a pH de 11 de 47.58 a 35.77 °S y a pH 13 de 19.99 a 20.36 °S; esta diferencia de rangos con énfasis a pH 13 es por el medio alcalino (pH 13) y la temperatura (50, 70 y 90 °C), en contraste Kelly & Brown (1978-79) quienes mencionan que las reacciones de la sacarosa y los monosacáridos en soluciones alcalinas acuosas no se discuten, ya que los medios no tienen relevancia en la pérdida de la sacarosa y la formación de color, de los resultados obtenidos vemos que es importante la investigación de la pérdida de sacarosa y los monosacáridos obtenidos por degradación en medio alcalino, ya que a pH alcalino muestra una disminución de hasta 12°S según los resultados obtenidos del gráfico 7.

La disminución de la sacarosa en el gráfico 7 se debe por la reacción del medio alcalino; esto es sustentado por EDYE, CLARKE, (1995), los cuales mencionan que en medio alcalino, la degradación de la sacarosa bajo calentamiento puede llevar a la formación de: furfural, acetona, gliceraldeidos, ácido láctico, ácido acético, ácido fórmico y dióxido de carbono entre otras sustancias, así también Eggleston y Vercellotti, (2000), afirman que la sacarosa generalmente se hidroliza para formar azúcares reductores, glucosa y fructosa, que están presentes en forma de catión D-glucosa y fructosil oxocarbenio en condiciones extremas de jugo ácido.

En contraste con el medio alcalino visto en los resultados del gráfico 6, Eggleston y Vercellotti, (2000), mencionan que bajo las condiciones alcalinas extremas con calor aplicado, la degradación de la sacarosa también resulta en la formación de furfural, acetona gliceraldehído, ácido láctico, ácido acético, ácido fórmico, dióxido de carbono y otros componentes que no son sacarosa; para evitar estas pérdidas de sacarosa por los medios alcalinos y ácidos ANDRADE, (1998), mencionan que para minimizar las pérdidas de sacarosa, por inversión y degradación alcalina las condiciones de trabajo durante el procesamiento del caldo de caña de azúcar son monitoreadas, de manera que el pH permanezca el mayor tiempo posible cerca de la neutralidad (pH 7,0).

Otro de los motivos por lo que la sacarosa puede disminuir es sustentado por Mooddley, (2001), el cual menciona que al añadirse un exceso de lechada de cal, esta puede aumentar la pérdida de la sacarosa precipitándola con los sólidos insolubles y perdiéndola en la torta del filtro, esto puede ser demostrado a pH 13, ya que para llegar a el pH requerido se necesita una mayor cantidad de lechada de cal, dando como resultado pérdida de la sacarosa en los precipitados del jugo clarificado.

4.3.3. Cinética de reacción de turbidez

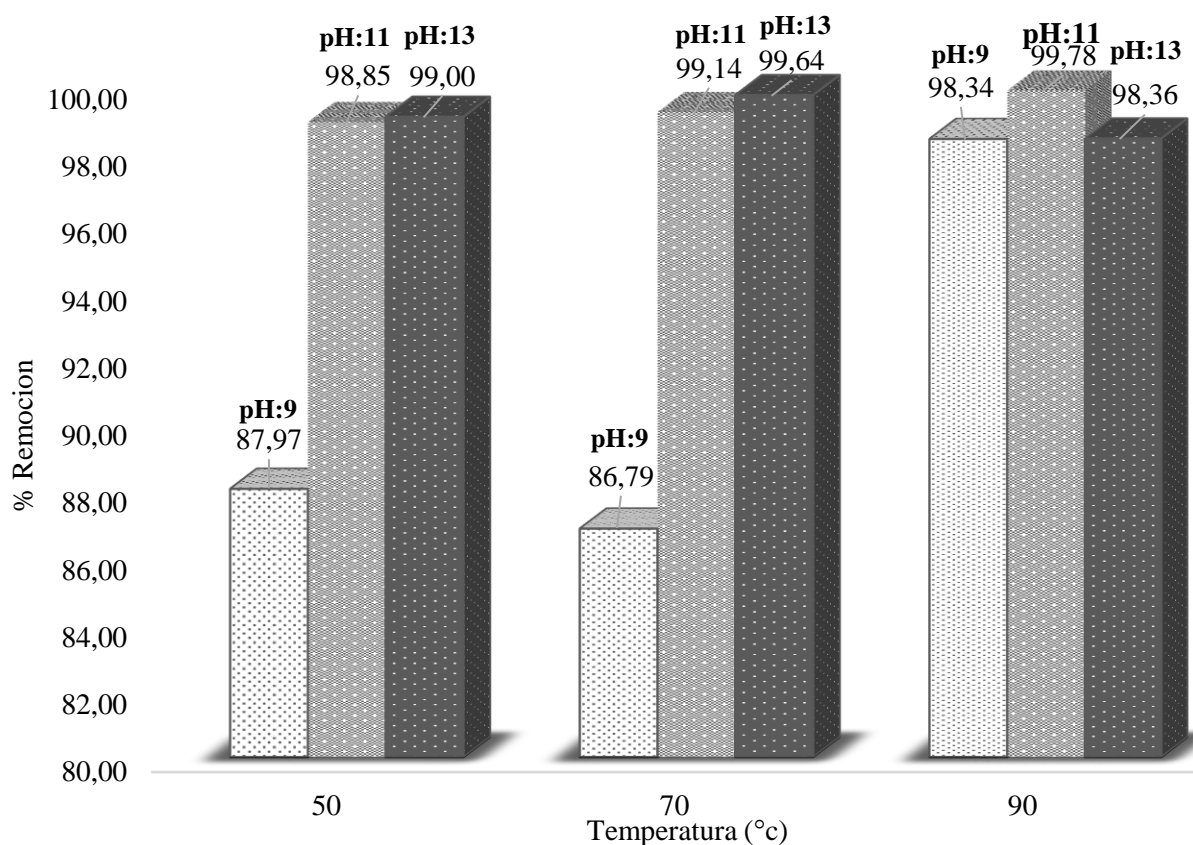


Grafico 8: % de remoción de turbidez a 50°C (pH: 9, 11,13); 70°C (pH: 9, 11, 13); y 90°C (pH: 9, 11, 13).

En el grafico 8 muestra el porcentaje de remoción manteniendo las temperaturas de 50°C a pH 9, 11 y 13 obteniéndose 87.97, 98.85 y 99 % de remoción de turbidez respectivamente , a temperatura de 70°C a pH 9, 11 y 13 se obtienen 86.79, 99.14 y 99.64 % de remoción de turbidez respectivamente y a 90°C a pH 9, 11 y 13 se obtienen 98.34, 99.78 y 98.36 % de remoción de turbidez respectivamente, con esto se demuestra que el pH y la temperatura son parámetros importantes, llegando a un valor máximo de remoción de 99.64% a pH 13 y 70°C.

El jugo de caña es una suspensión coloidal en la cual las partículas suspendidas que se encuentran en el jugo están cargadas negativamente por lo tanto las partículas se mantienen separadas, para que estas partículas se junten y aglomeren formando flóculos se tiene que adicionar una carga positiva al jugo y es lo que se realiza en la alcalización con la adición de iones de calcio, el calcio en forma de óxido de calcio reacciona con dióxido de carbono y los fosfatos que se encuentran en el medio en condiciones controladas, según Hamerski et al. (2011), una de las principales

reacciones que se desea en este medio es del hidróxido de calcio (cal hidratada) con el CO_2 para formar y precipitar el carbonato de calcio; siendo uno de sus funciones del carbonato de calcio el adsorber e incorporar gran parte de la materia coloidal e insoluble durante la etapa de sedimentación, disminuyendo la turbidez del jugo de caña; a la vez ALBUQUERQUE, (2009), menciona que el nivel de fosfato en el jugo es un determinante clave para una clarificación y remoción de turbidez eficiente, los niveles adecuados de fosfato deben ser mayores a 300 mg / kg como P_2O_5 , siendo importante para la formación de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (fosfato tricalcico), los cuales poseen una carga positiva por la presencia del ion calcio, los fosfatos presentes en el jugo de caña reacciona con la cal adicionada, formando fosfatos de calcio insolubles, que son los principales agentes de purificación en la separación de otros no azúcares.

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.

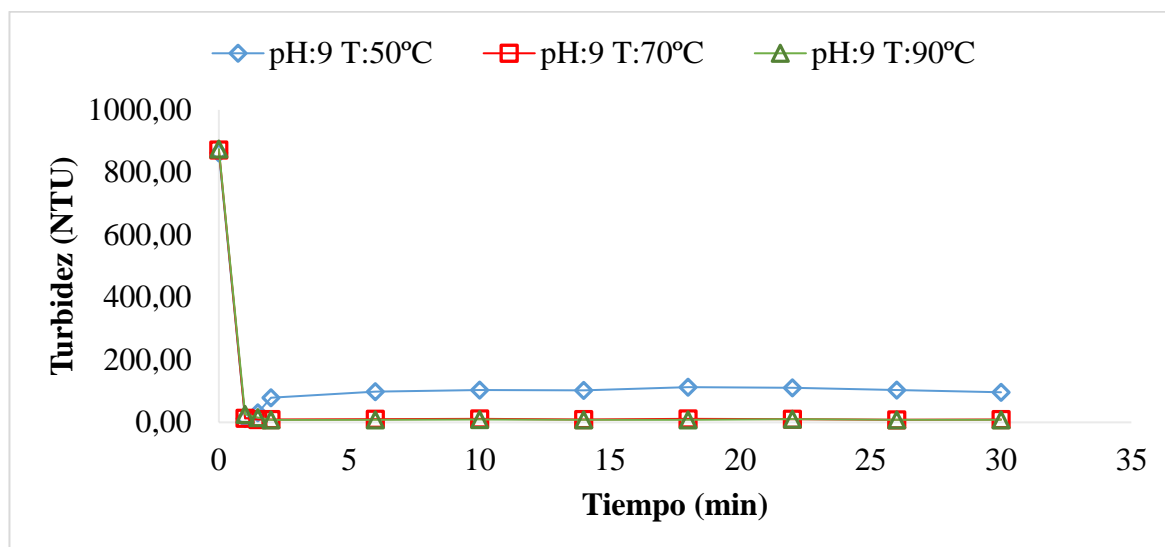


Gráfico 9: Cinética de reacción de Turbidez en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 9 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

En la gráfica 9, las cinéticas de reacción de pH 9 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C, muestran que la carbonatación es eficiente en la remoción de los materiales que se encuentran en suspensión del jugo de caña de azúcar, pues, los índices de remoción de turbidez fueron 87.97, 98.85, y 99 % respectivamente, dando un promedio de 95.27% de remoción de turbidez, estos resultados fueron demostrados por Moodley (2003), el cual obtuvo un excelente porcentaje de remoción de turbidez de 95%, a

temperaturas altas y en pH de 9, confirmando que el proceso de clarificación del caldo de caña por carbonatación tiene gran potencial; de igual manera, (Hamerski, 2011) en su investigación titulada ESTUDO DE VARIÁVEIS NO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO DO CALDO DE CANA DE AÇÚCAR demuestra que al igual que en la relación entre la temperatura y el pH, las mayores remociones de turbidez se obtienen en mayores temperaturas, ya que favorece a la precipitación de almidones y fosfatos los cuales forman parte del material en suspensión y contribuyen al aumento de turbidez del jugo de caña.

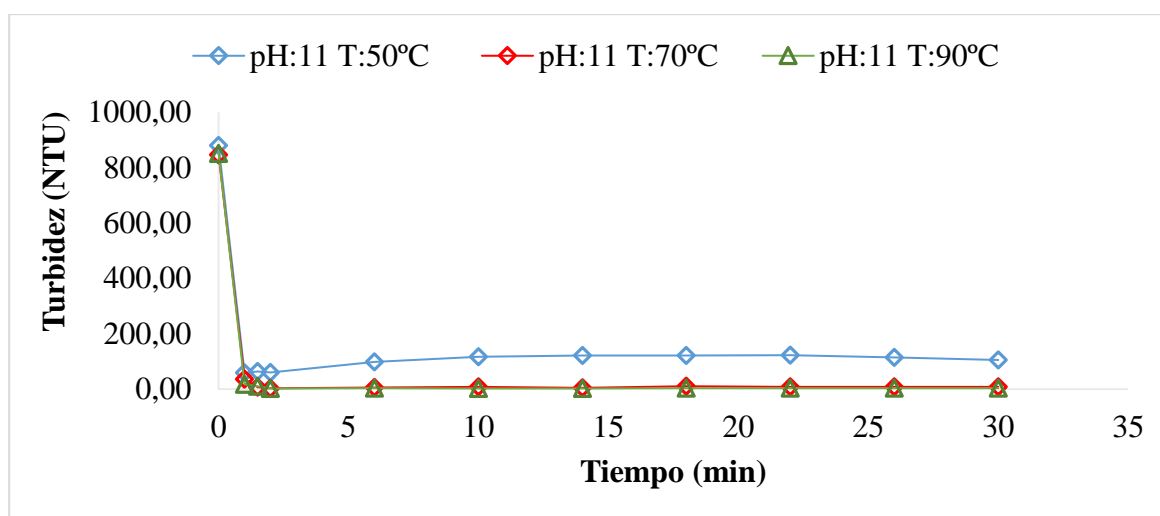


Grafico 10: Cinética de reacción de Turbidez en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 11 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

En el grafico 10, las cinéticas de reacción de pH 11 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C, los índices de remoción de turbidez fueron 86.79, 99.14 y 99.64 % respectivamente, dando un promedio de 95.64% de remoción de turbidez, siendo este promedio de remoción mayor que el promedio anterior, demostrando que a mayor pH influye positivamente en la remoción de sólidos en suspensión, en contraste (Hamerski, 2011) menciona según su investigación , el efecto del pH, tiempo y temperatura, afecta en el porcentaje de remoción de turbidez y que para obtener el 99% de remoción de turbidez se necesitan las condiciones de pH inferior a 8, tiempo mínimo o superior a 50 minutos y una temperatura mínima o superior a 75 ° C, sin embargo Moodley (2003). Muestra resultados que concuerdan con nuestra investigación, demostrando que la reacción en pH 5 y 6 es poco eficiente en la remoción de impurezas del jugo de caña de azúcar en el proceso de clarificación por carbonatación a la vez menciona que en condiciones de pH bajo, la reacción de carbonatación es

muy lenta, siendo necesarias grandes cantidades de CO₂ para alterar el pH del medio. Con ello, el consumo de cal es mínimo permitiendo la formación de pequeñas cantidades de precipitados e ineficiencia en la remoción de compuestos indeseables en la obtención de azúcar de buena calidad.

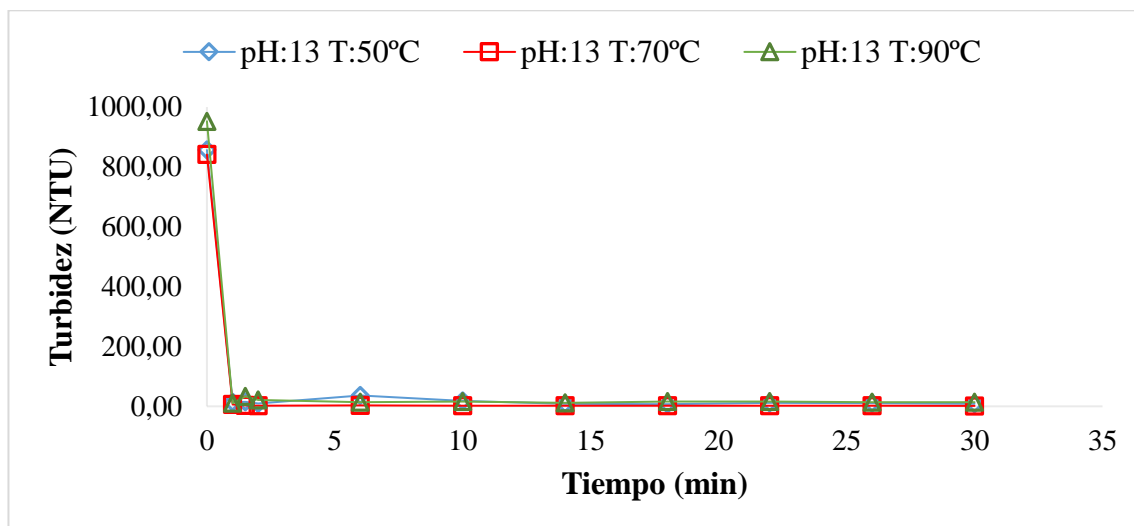


Gráfico 11: Cinética de reacción de Turbidez en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 13 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

En la gráfica 11, las cinéticas de reacción de pH 13 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C, demuestra que la carbonatación es eficiente en la remoción de los materiales que se encuentran en suspensión en el caldo de caña de azúcar, pues los índices mínimos, aproximados, de reducción de turbidez fueron de 99, 99.64 y 98.36 % respectivamente, dando un promedio de 99% de remoción de turbidez, siendo este promedio mayor que los promedio anteriores a pH de 9 y 11, demostrando que a mayor pH influye positivamente en la remoción de sólidos en suspensión

La temperatura además de actuar directamente sobre algunas impurezas, como en la desnaturalización proteica, reduce la viscosidad del medio reactivo, proporcionando mayor contacto de las impurezas con los precipitados de la carbonatación. Esto puede favorecer la adsorción de los compuestos indeseables en la superficie de los precipitados y la sedimentación de ambos. Por lo tanto, la reducción de la turbidez se pone de manifiesto, según Eggleston (2000), la remoción de turbidez es uno de los principales parámetros de evaluación de la capacidad de clarificación, pues la mayor turbidez se debe a la presencia de los no azúcares en el caldo y, la reducción de ésta puede ser indicio de remoción de estos componentes (gomas, el almidón, la proteína).

4.3.4. Cinética de reacción de azúcares reductores

4.3.4.1. Cinética de reacción de los azúcares reductores en el jugo de caña a temperatura de 50, 70 y 90 °C pH de 9, 11 y 13

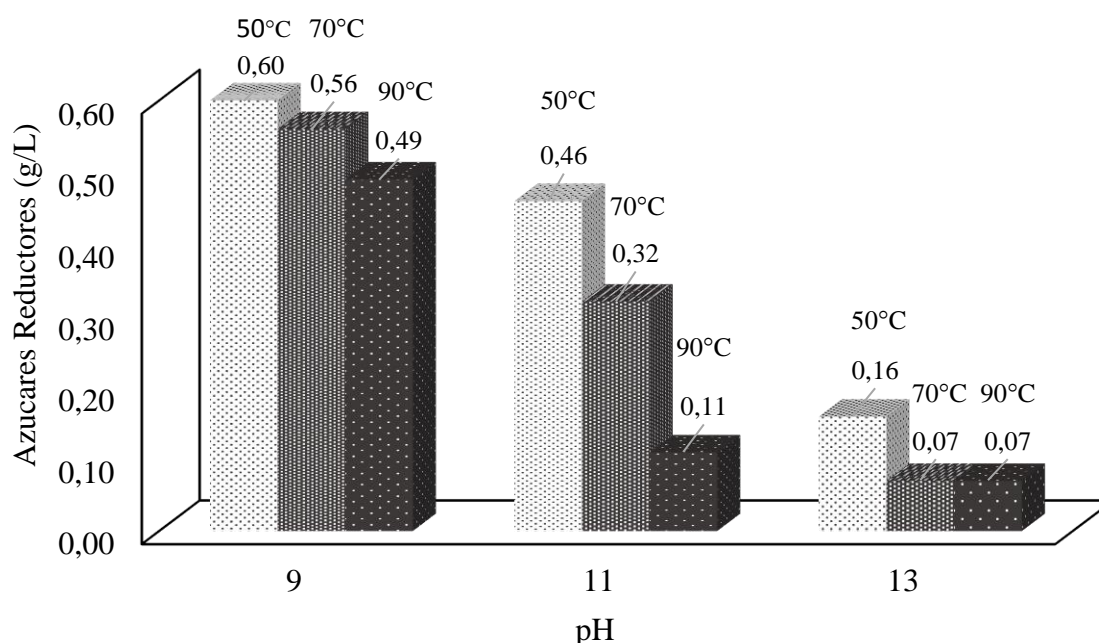


Gráfico 12: azúcares reductores (g/l) a 50°C (pH: 9, 11,13); 70°C (pH: 9, 11, 13); y 90°C (pH: 9, 11, 13).

Todas las cinéticas de reacción inician con 0.73g/l de azúcares reductores en promedio, pero estas tienden a disminuir luego del encalado, a pH 9 la mayor degradación de azúcares reductores se dio a temperatura de 90°C llegando a disminuir hasta 0.49 g/l de azúcares reductores, a pH 11 muestra la misma tendencia al aumentar la temperatura ya que la degradación de los azúcares es máxima a temperatura de 90°C, obteniendo hasta 0.11 g/l de azúcares reductores; en el caso de pH 13, la temperatura de 70 y 90°C muestran un mismo promedio de disminución de 0.07 g/l de azúcares reductores, con estos resultados se demuestra que el proceso de carbonatación a pH alcalinos y temperaturas altas favorecen a la degradación de los monosacáridos, los cuales son perjudiciales en la etapa de clarificación o futuros procesos; FARINE et al., (2000) comprueba que las soluciones acuosas de glucosa y fructosa se degradan con mayor facilidad en condiciones alcalinas (pH mayores a 8) y altas temperaturas mayores de 85 ° C, a la vez Cox et al. (1990), menciona que uno de los factores que influye en la degradación alcalina de los azúcares reductores al ácido láctico es la temperatura y demuestra que para minimizar la

formación de ácido láctico en la refinería, la temperatura del encalado se redujo de 90 °C a menos de 85 ° C.

Los mayores valores de pH y temperatura llevan a los menores contenidos de azúcares reductores, esta tendencia está de acuerdo con la literatura que destaca el favorecimiento de la degradación de los azúcares reductores en condiciones de alcalinidad y temperatura elevada (DELGADO, CESAR, 1977, FARINE et al., 2000, EGGLESTON, VERCELLOTTI, 2000), mencionan que la presencia de cationes divalentes, como el calcio y el magnesio, aceleran la descomposición de los monosacáridos.

En este estudio, el proceso de clarificación del caldo de caña de azúcar, emplea cal hidratada y al trabajar en condiciones de mayor alcalinidad, la presencia de iones calcio es más acentuada. Por lo tanto, la reacción de degradación de los azúcares reductores es favorecida, de hecho EDYE, (2001), ha reportado que la degradación alcalina de los monosacáridos se produce a través de una compleja red de reacciones (de Bruijn et al., 1984). Inicialmente, las reacciones reversibles se inician por un equilibrio entre las formas neutras e ionizadas de los monosacáridos. El oxianión en el carbono anomérico debilita el enlace C-O del anillo y permite la mutorrotación y la isomerización a través de un intermedio de enediol. Es esta reacción la responsable de la aparición a veces informada de D-manosa en mezclas alcalinas de sacarosa e invertida; Los tres azúcares reductores están en equilibrio a través del intermedio de enediol, de igual manera BADUI, (1987), menciona que un medio alcalino inducen a diversas transformaciones en los monosacáridos, se produce la isomerización de los azúcares, como ocurre con la glucosa que se tautomeriza y produce un enol, que por un arreglo de Lobry De Bruyn y Alberda Van Eckenstein se convierte en una mezcla de D-fructosa(32%), D-manosa(3%) y D-glucosa(65%). Este cambio que es más fácil a pH alcalino puede ocurrir de igual manera en condiciones ácidas, pero a un menor velocidad, también menciona que a más alcalinidad puede formarse enoles todos los carbonos del monosacárido, estos se rompen en los átomos en que se localiza la doble ligadura, por ejemplo la hidrólisis de un enol entre C-1 y el C-2 produce una molécula de formaldehído y una pentosa, entre el C-2 y el C-3 una tetrosa y aldehído glicólico, y entre el C-3 y el C-4, gliceraldehído y una triosa. Las aldosas que se generan con este rompimiento pueden a su vez enolizarse y sintetizar

a nuevos compuestos, entre los cuales destacan el diacetilo, el acetol, la acetoina y algunos ácidos como el láctico, el propionico y el pirúvico.

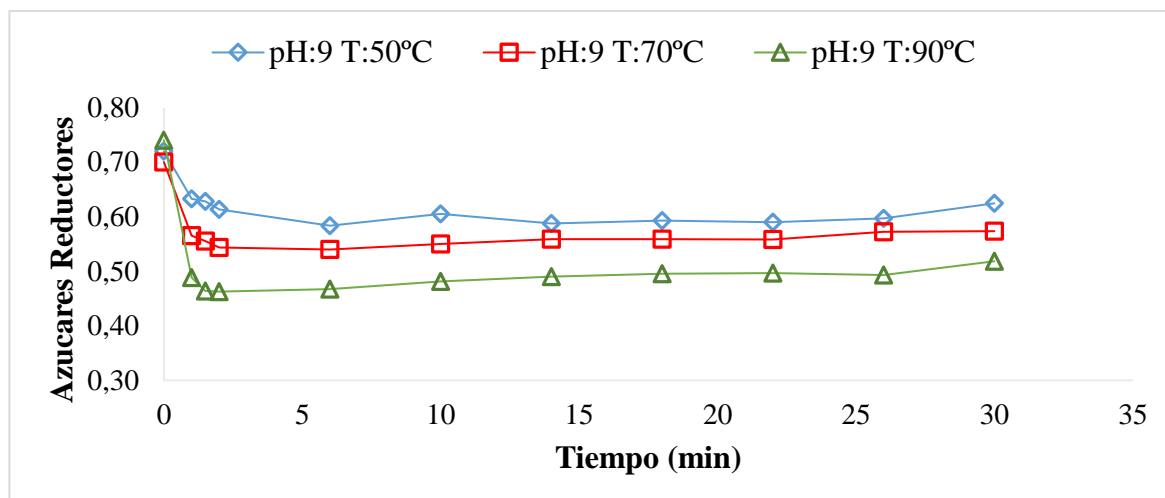


Grafico 13: Cinética de reacción de Azúcares Reductores en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 9 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

Evaluando los azúcares reductores en función de las temperaturas 50, 70 y 90 °C y pH 9, se observó un rango de degradación de [0.60 – 0.49] g/l de azúcares reductores; la mínima degradación se dio en las condiciones de pH 9 y temperatura de 50°C disminuyendo de 0.72 a 0.60 g/l de azúcares reductores en comparación de la temperatura de 90°C el cual mostro una mayor disminuyendo de 0.74 a 0.49 g/l, en el que se demuestra que la mayor degradación de azúcares reductores se da a mayor temperatura y en pH mayores a 8, este comportamiento es verificado por Hamerski, 2001, el cual demuestra la eficiencia de las condiciones de la carbonatación en pH alcalino y altas temperaturas para degradar los azúcares reductores, ya que de acuerdo a sus resultados, toma como punto inicial 5.53 % de azúcares reductores para luego mostrar una disminución hasta 3.11% de azúcares reductores a pH 9.5 y temperatura de 80°C.

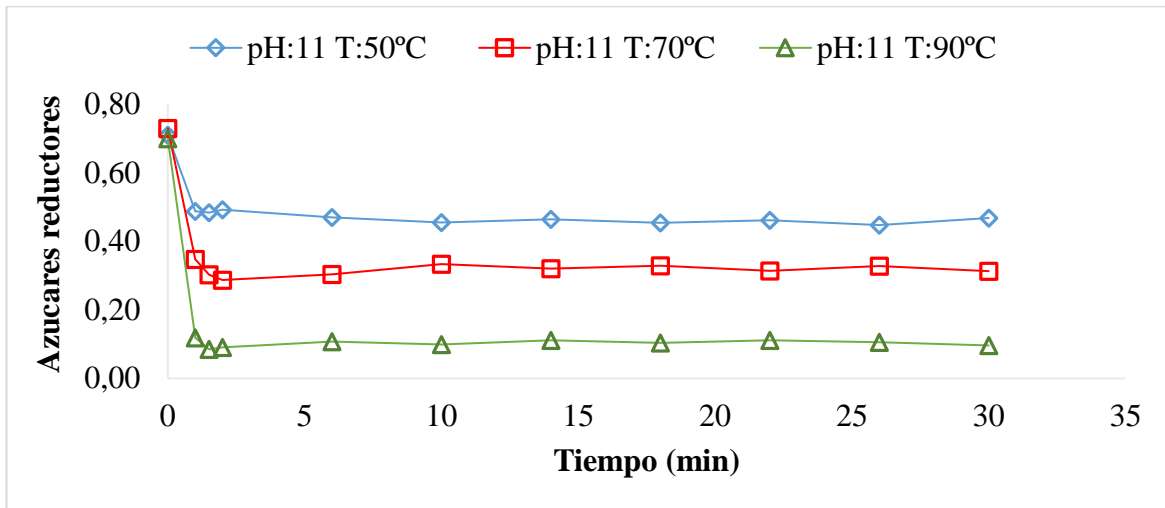


Grafico 14: Cinética de reacción de Azúcares Reductores en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 11 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

En el grafico 14 se observa un rango de degradación de [0.46 – 0.11] g/l de azúcares reductores siendo este menor que el grafico 13 que mostro un rango de degradación de [0.60 – 0.49] g/l de azúcares reductores; la mínima degradación se dio en las condiciones de pH 11 y temperatura de 50°C disminuyendo de 0.75 a 0.46 g/l, en comparación de la temperatura de 90°C el cual mostro una mayor disminuyendo de 0.75 a 0.11 g/l de azúcares reductores, en el que se demuestra de igual manera como en el grafico 13, que a mayor temperatura mayor será la degradación de azúcares reductores teniendo en cuenta que el pH también es un parámetro importante ya que este grafico mostraron resultados a pH 11.

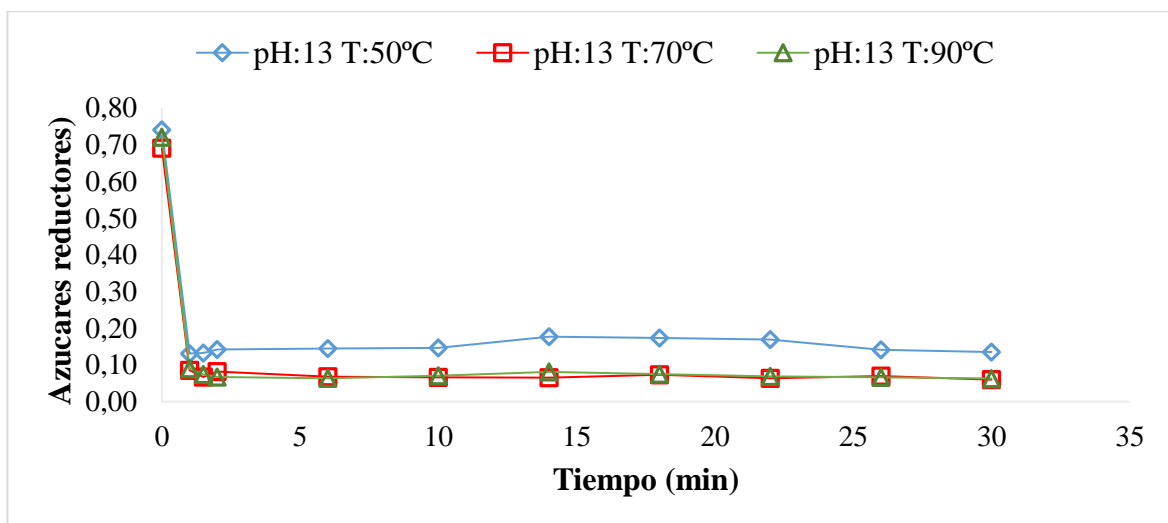


Grafico 15: Cinética de reacción de Azúcares Reductores en la clarificación del jugo de caña por carbonatación a pH: 13 y Temperatura de 50, 70 y 90 °C.

En el grafico 15 se observa un rango de degradación de [0.16 – 0.07] g/l de azúcares reductores siendo este menor que el grafico 13 y grafico 14 que mostraron un rango de degradación de [0.60 – 0.49] g/l y [0.46 – 0.11] g/l de azúcares reductores respectivamente; la mínima degradación se dio en las condiciones de pH 13 y temperatura de 50°C disminuyendo de 0.74 a 0.16 g/l de azúcares reductores en comparación de la temperatura de 90°C el cual mostro una mayor disminuyendo de 0.75 a 0.07 g/l, en el que se demuestra de igual manera como en el grafico 1 y grafico 2 que a mayor temperatura, mayor será la degradación de azúcares reductores, teniendo en cuenta que el pH también es un parámetro importante ya que este grafico muestra resultados a pH 13, Moodley et al. (2003) observó el mismo comportamiento en la carbonatación del caldo de caña acotando que la carbonatación en pH más alto conduce a los caldos clarificados con menor porcentaje de azúcares reductores, esta tendencia está de acuerdo con la literatura que destaca el favorecimiento de la degradación de los azúcares reductores en condiciones de alcalinidad y temperatura elevada, esta respuesta puede estar asociada a la temperatura de reacción de 80 ° C que tiene un efecto favorable a la degradación de los azúcares reductores según EGGLESTON et al., (2000).

4.4. Modelamiento de las cinéticas de reacción en la clarificación del jugo de caña.

Todas las cinéticas de clarificación de jugo de caña por carbonatación son ajustadas al modelo de Medilli, siendo esta el que mejor describe el proceso mostrando valores de R² cercanos a 1. (Anexo 3)

Variable	Temperatura (°C) y pH	Modelo	Ecuación de mejor ajuste	Constantes	R ²
°Brix	pH: 9 Temperatura: 50, 70 y 90°C	Medilli y = a*exp(kt ⁿ)+bt	y = 7.996*exp(0.029*t ^{0.192})+0.01*t x: tiempo[s] y: °Brix	a= 7.996 k= 0.029 n= 0.192 b= 0.01	0.78
	pH: 11 y 13 Temperatura: 50, 70 y 90°C	Medilli y = a*exp(kt ⁿ)+bt	y = 8*exp(-0.2*t ^{-0.19})+0.019*t x: tiempo[s] y: °Brix	a= 8 k= -0.2 n=- 0.19 b= 0.019	0.82
Sacarosa (°S)	<ul style="list-style-type: none"> pH 11 y temperatura: 50,70 y 90°C pH:9 y temperatura: 70°C 	Medilli y = a*exp(kt ⁿ)+bt	y = 32.47*exp(0.19*t ^{0.007})+0.001*t x: tiempo[s] y: Sacarosa [°S]	a= 32.47 k= 0.19 n=0.007 b= 0.001	0.89
	<ul style="list-style-type: none"> pH:13 y temperatura: 50,70 y 90°C pH: 9 y temperatura: 50, 90°C 	Medilli y = a*exp(kt ⁿ)+bt	y = 31*exp(-0.2*t ^{-0.09})+0.01*t x: tiempo[s] y: Sacarosa [°S]	a= 31 k= -0.2 n=0.09 b= 0.01	0.87
Azúcares Reductores (g/l)	pH: 9,11 y 13 temperatura:50, 70 y 90°C	Medilli y = a*exp(kt ⁿ)+bt	y = 0.7*exp(-0.5*t ^{0.006})+0.001*t x: tiempo[s] y: Azúcares Reductores [g/l]	a= 0.7 k= -0.5 n=0.006 b= 0.001	0.85
Turbidez (NTU)	pH: 9,11 y 13 temperatura:50, 70 y 90°C	Medilli y = a*exp(kt ⁿ)+bt	y = 850*exp(5*t ⁵⁰)+1.5*t x: tiempo[s] y: Turbidez [NTU]	a= 850 k= 5 n= 50 b= 1.5	0.79

4.5. Optimización de los °Brix en la clarificación del jugo de caña

4.5.1. Análisis de varianza para los °Brix.

Tabla 11: Corridas experimentales para obtener los °Brix.

Tratamiento	pH	Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)	°Brix	
				Experimento 1	Experimento 2
1	13	25	50	5,21	5,29
2	9	30	90	8,5	8,59
3	11	30	50	8,26	7,24
4	9	20	50	8,13	8,27
5	13	20	50	6,36	6,34
6	11	25	50	8,02	7,77
7	11	30	70	7,43	6,99
8	9	30	70	8,34	8,45
9	9	20	70	8,12	8,12
10	11	20	70	7,22	7,29
11	13	25	70	4,58	4,55
12	9	20	90	8,22	8,33
13	9	25	90	8,3	8,33
14	13	20	70	4,46	4,82
15	9	25	50	8,87	8,84
16	13	25	90	4,7	4,44
17	13	30	70	4,2	4,42
18	11	20	50	7,75	7,82
19	11	20	90	6,81	6,52
20	11	30	90	6,92	5,97
21	13	30	50	4,6	4,66
22	13	30	90	4,48	4,23
23	9	30	50	8,79	8,9
24	11	25	90	7,19	7,28
25	13	20	90	4,96	4,78
26	11	25	70	7,63	7,57
27	9	25	70	8,25	8,41

Para determinar el análisis de varianza con respecto a los °Brix en la clarificación de jugo de caña por carbonatación se usó la tabla 11, en donde se muestran los resultados de las 27 experiencias realizadas en el laboratorio por duplicado para lograr obtener la variable respuesta (°Brix), cabe mencionar que los valores en la tabla 11 son los promedios de los últimos 6 puntos ya que a partir del punto 5 de la cinética de reacción es constante (Anexo 2), con estos resultados se realizaron los análisis estadísticos correspondientes a los °Brix.

El objetivo principal del análisis es el de determinar el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente, en la tabla 12, se observa el efecto que tienen los factores de temperatura, pH y tiempo sobre los °Brix en la clarificación de jugo de caña, además se determinó los diferentes niveles de los efectos estadísticos de la temperatura y el pH sobre el valor de la variable dependiente o de respuesta (°Brix).

Tabla 12: Análisis de Varianza (ANOVA) para °Brix en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	97,5485	1	97,5485	518,35	0,0000
B:Tiempo	0,525625	1	0,525625	2,79	0,1019
C:Temperatura	1,5376	1	1,5376	8,17	0,0065
AA	12,2681	1	12,2681	65,19	0,0000
AB	0,207204	1	0,207204	1,10	0,2999
AC	4,25042	1	4,25042	22,59	0,0000
BB	0,0228231	1	0,0228231	0,12	0,7294
BC	0,893204	1	0,893204	4,75	0,0349
CC	0,10957	1	0,10957	0,58	0,4496
bloques	0,0824463	1	0,0824463	0,44	0,5116
Error total	8,09225	43	0,188192		
Total (corregido)	125,538	53			

*valores estadísticamente significativos al 5% de significancia ($p < 0.05$).

Se observa en la tabla 12 que los factores o variables independientes, pH y temperatura y sus interacciones tuvieron un nivel de significancia sobre los °Brix a diferencia del tiempo que no tuvo un nivel de significancia, también se puede

observar que los efectos cuadráticos de los factores temperatura y tiempo no tuvieron un efecto significativo sobre la experiencia. De esta misma manera se observa que la interacción entre el pH y tiempo no tienen efecto significativo sobre los °Brix.

Con la tabla 12 se puede comprobar que se puede lograr obtener buenos resultados en los °Brix manejando los factores de forma independientemente o sus interacciones ya que tanto la temperatura y el pH tienen un efecto sobre los °Brix en la clarificación del jugo de caña.

El ajuste del modelo fue justificado con la variación del coeficiente de determinación R^2 fue de 0.935539 para los °Brix en el jugo de caña clarificado por carbonatación, que se interpretó como 93.5539% de la variabilidad de la respuesta observada que se puede explicar mediante el modelo ajustado en la forma codificada, por otro lado el coeficiente ajustado por grados de libertad fue de 0.922354, el cual representa un valor cercano a 0.935539 que asegura el ajuste satisfactorio del modelo polinomial a los datos experimentales.

4.5.2. Diagrama de Pareto para los °Brix en la clarificación del jugo de caña.

El grafico de Pareto para cada factor de estudio con su respectiva respuesta, con todos los efectos posibles estandarizados, a un nivel de confianza de 0.05, muestra que el pH (efecto lineal y cuadrático) es el primer factor que mayor influencia tuvo sobre la variable respuesta, seguido por la interacción del pH y la temperatura, las cuales tuvieron un efecto significativo negativo para los °Brix, en contraste se observa que la interacción del tiempo y la temperatura tienen efecto significativo positivo para los °Brix según el grafico de Pareto, por otro lado se pudo notar que el tiempo con sus interacción con el pH no tienen efecto sobre los °Brix en el jugo de caña estudiado.

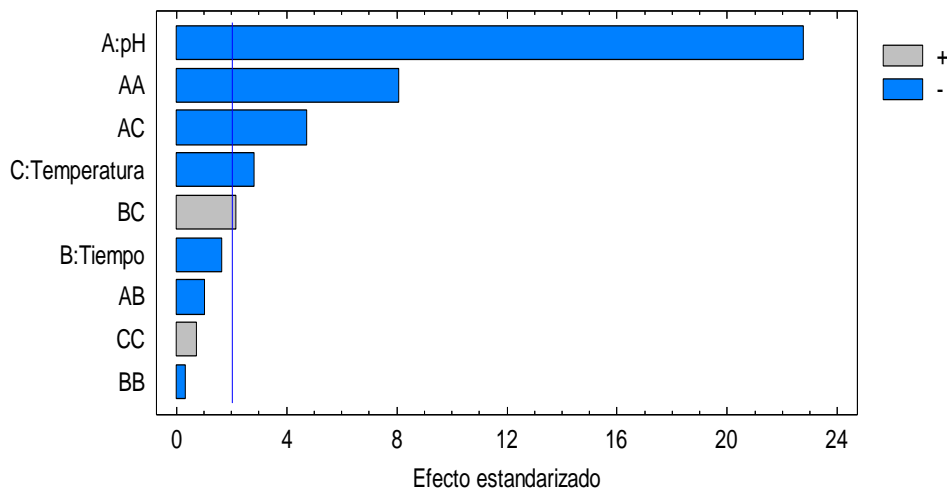


Gráfico 16: Diagrama de Pareto de los factores y sus efectos estandarizados para los °Brix en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

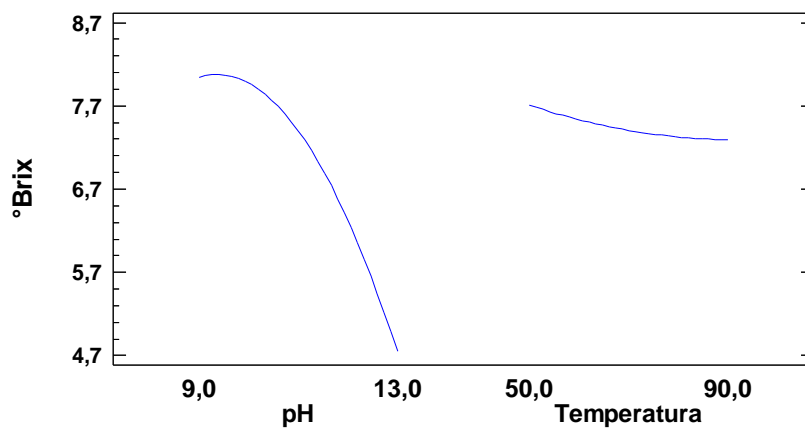


Gráfico 17: Gráfico de efectos principales para °Brix en la clarificación del jugo de caña.

Según el gráfico 17 para los °Brix, se puede observar que el pH tiene mayor efecto, demostrando que a pH 9 se obtiene mejores resultados de °Brix en contraste con el pH 13, por otro lado la temperatura no tiene mayor efecto, ya que no existe mayor diferencia en la variación de los °Brix a temperatura de 50 y 90°C

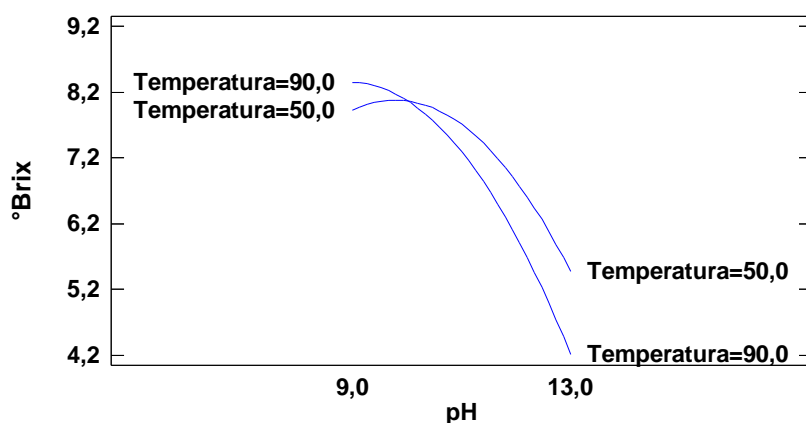


Gráfico 18: Gráfico de interacciones para °Brix en la clarificación del jugo de caña.

En el gráfico 18 para los °Brix, se observa la influencia de la interacción de la temperatura y el pH en la clarificación del jugo de caña, siendo el pH el que mayor efecto tiene en los °Brix, ya que se obtendrán mejores resultados a pH 9 en comparación de pH 13, por otro lado la temperatura muestra un efecto positivo ya que se obtienen mejores resultados a pH 9 y temperatura de 90°C en contraste con la temperatura de 50°C, a diferencia del pH 13, en el cual a temperaturas de 50 y 90°C no muestran resultados óptimos.

4.5.3. Optimización de los °Brix en la clarificación del jugo de caña.

En vista de los resultados obtenidos del análisis de varianza, se obtuvo un modelo codificado representado en la siguiente ecuación, en la cual muestra las condiciones ideales para lograr el máximo valor de la variable respuesta (°Brix).

La ecuación cuadrática que modela empíricamente los °Brix en el proceso de clarificación que está en función de la temperatura, pH y tiempo, es la siguiente.

$$\begin{aligned}
^{\circ}\text{Brix} = & -19,999 + 5,70681 * A + 0,0302222 * B + 0,0237222 * C \\
& - 0,252778 * A^2 - 0,00929167 * A * B - 0,0105208 * A * C \\
& - 0,00174444 * B^2 + 0,00192917 * B * C + 0,000238889 \\
& * C^2
\end{aligned}$$

Donde:

A: pH

B: Tiempo (min)

C: Temperatura (°C)

La visualización de la ecuación del modelo predictivo puede obtenerse por el plano de superficie respuesta y por el plano de contorno el plano de superficie de respuesta es n plano teórico tridimensional que muestra la relación entre la respuesta y las variables independientes. La proyección o pantalla de dos dimensiones del plano de superficie se llama plano de contorno, las líneas de respuesta constante son trazadas en el plano de las variables independientes. Los planos de contorno ayudan a visualizar la forma de una superficie respuesta.

Estos planos dan información útil del ajuste o arreglo del modelo, pero estos no pueden representar el verdadero comportamiento del sistema.

Las respuestas para el modelo de regresión ajustado se presentaron gráficamente en las figuras a continuación. Los planos de superficie de respuesta y de contorno se generaron por la combinación de pares de los dos factores de estudio (pH y temperatura), mientras que el tiempo se excluyó al no tener significancia en los resultados

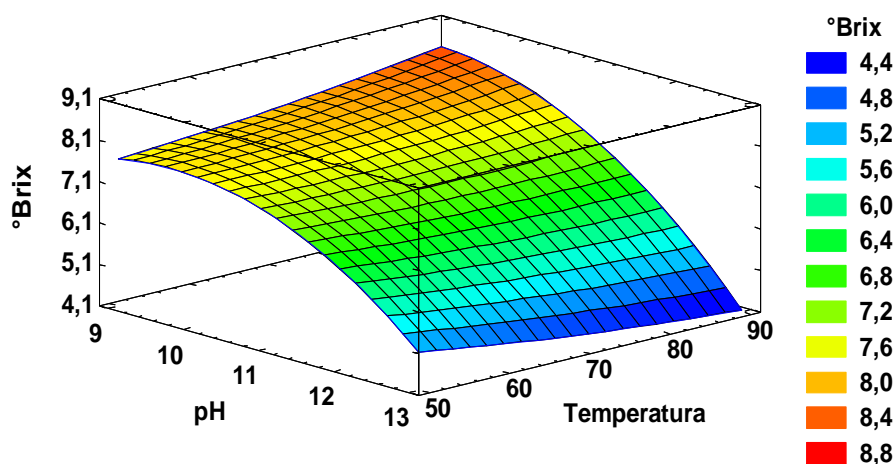


Gráfico 19: Superficie respuesta para optimizar los °Brix en el proceso de clarificación por carbonatación tomando como ejes dos de sus factores, temperatura y pH.

El gráfico 19, ilustra el efecto tanto del pH como la temperatura sobre los °Brix del jugo de caña clarificado, con una concentración inicial de 8 °Brix, mostrando una superficie con mínimos y máximos, y un plano de contorno que representa la interacción de estos dos factores, con líneas hiperbólicas, que confirman el punto estacionario de la figura presentada. La figura muestra que manteniendo constante el tiempo de reacción en 30 minutos, disminuyendo el pH y aumentando la temperatura, dentro de los valores mínimos y máximos que nos muestra la superficie, los °Brix tenderán a subir hasta 8.4°Brix. Si bien el gráfico nos muestra un máximo valor de 8.8 °Brix de, la condición máxima buscada y planteada es de 8,47204 °Brix, este valor se encuentra entre los colores rojo y anaranjado, siendo la región óptima de color rojo, la cual muestra un mayor resultado de los °Brix.

Según Hamerski (2011), en su investigación “Estudo De Variáveis No Processo De Carbonatação Do Caldo De Cana-De-Açúcar”, la clarificación del jugo de caña de azúcar en pH más bajo de 7 a 9 y temperaturas más altas converge en el sentido de los mayores valores de °Brix, mientras que, en condiciones de pH más alto de 10, se obtienen los menores contenidos de °Brix, en este caso, se evidencia que el objetivo de la temperatura es el concentrar los °Brix del medio de jugo de caña, demostrando que el efecto de la temperatura es inferior a pH altos, provocado por el volumen de cal hidratada agregado al birreactor.

Esta investigación confirma lo que se observó en los análisis de factores, lo cual indica que tanto el pH como la temperatura, son variables significantes e importantes para la etapa de clarificación del jugo de caña, con esto se puede ver que si bien el tiempo es importante en el momento de la clarificación, ya que con el tiempo se puede observar la variación de las variables y así ver el tiempo óptimo, pero los °Brix llega a un punto donde es independiente del tiempo, es decir que llega a un punto donde los °Brix por más tiempo que se le dé, el resultado seguirá manteniendo un promedio lineal o constante. Por ello es importante el estudio de estos factores, ya que si bien estos tienen alguna interacción esta investigación nos ayuda a conocer mejor el comportamiento de los factores, lo que nos ayuda a encontrar los valores óptimos de análisis.

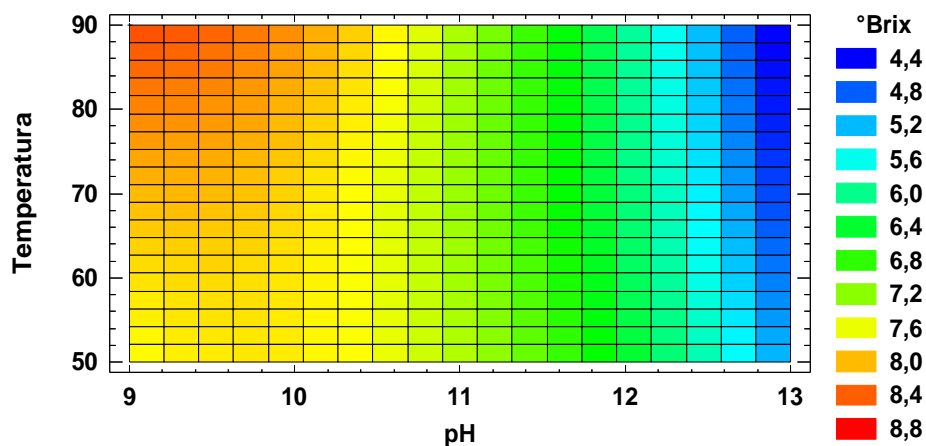


Gráfico 20: Contorno de superficie respuesta para los °Brix en la clarificación del jugo de caña.

Lo mencionado se puede apreciar concretamente en el gráfico de contornos de superficies de respuesta. La superficie de color anaranjado muestra la zona óptima de los °Brix, debido a que en esta zona encontramos el mayor valor de los °Brix planteado al inicio de la investigación.

El gráfico 20 da a notar claramente que la relación de las variables de pH y temperatura son inversamente proporcionales, ya que a mayor pH [11-13] y a cualquier temperatura, los °Brix serán mínimos, pero a menores valores de pH [9-

10], los °Brix tendrán valores óptimos, mostrando así la influencia de la temperatura, ya que a mayor temperatura los °Brix aumentarían.

Estos dos factores ya mencionados son muy importantes en el proceso de elaboración de azúcar; por eso es muy importante saber manipularlos de tal manera que obtengamos los resultados requeridos asegurándonos que sean los más adecuados, es decir, los óptimos.

Ya conociendo el rango donde se encuentran los valores óptimos de los factores tratados y las ecuaciones que nos genera la superficie de respuesta; los valores óptimos encontrados fueron; un pH 9, tiempo de 30 minutos y temperatura de 90°C.

Tabla 13: Valores óptimos para los °Brix en la clarificación del jugo de caña.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	9,0	13,0	9,0
Tiempo(min)	20,0	30,0	30,0
Temperatura(°C)	50,0	90,0	90,0

La tabla 13 presenta los valores reales de los factores o variables independientes que dan valor óptimo de la respuesta de °Brix en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

Estos valores se encuentran dentro del rango de los niveles estudiados, el punto estacionario del modelo cuadrático ajustado, constituye un máximo de la respuesta el cual corresponde a un valor de 8,47204 °Brix, con un pH 9, tiempo de 30 minutos y temperatura de 90°C.

4.3.Optimización de la sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

4.3.1. Análisis de varianza para Sacarosa

Tabla 14: Corridas experimentales para obtener Sacarosa.

Tratamiento	pH	Tiempo (Minutos)	Temperatura (°C)	Sacarosa (°S)	
				Experimento 1	Experimento 2
1	13	25	50	19,95	19,39
2	9	30	90	34,6	33,67
3	11	30	50	38,69	38,38
4	9	20	50	29,54	30,04
5	13	20	50	22,94	23,21
6	11	25	50	34,51	35,93
7	11	30	70	40,83	39,77
8	9	30	70	31,22	33,63
9	9	20	70	32,07	34,42
10	11	20	70	41,67	44,42
11	13	25	70	19,44	19,67
12	9	20	90	33,2	33,32
13	9	25	90	32,1	34,61
14	13	20	70	19,22	19,79
15	9	25	50	28,13	28,89
16	13	25	90	32,29	32,56
17	13	30	70	19,95	19,69
18	11	20	50	33,51	33,58
19	11	20	90	39,01	37,89
20	11	30	90	51,24	51,51
21	13	30	50	18,14	18,5
22	13	30	90	36,69	36,85
23	9	30	50	26,02	25,43
24	11	25	90	52,89	52,94
25	13	20	90	33,33	33,74
26	11	25	70	41,99	41,35
27	9	25	70	31,78	34,28

Para determinar el análisis de varianza con respecto a sacarosa en la clarificación de jugo de caña por carbonatación se usó la tabla 14, en donde se muestran los resultados de las 27 experiencias realizadas en el laboratorio por duplicado para lograr obtener la variable respuesta (sacarosa), cabe mencionar que los valores en la tabla 14 son los promedios de los últimos 6 puntos de las cinéticas mostradas en los gráficos 5, 6 y 7, ya que a partir del 5 punto la cinética de reacción es constante (Anexo 2), con estos resultados se realizaron los análisis estadísticos correspondientes a sacarosa.

El objetivo principal del análisis es el de determinar el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente, en la tabla 15, se observa el efecto que tienen los factores de temperatura, pH y tiempo sobre la sacarosa en la clarificación de jugo de caña, además se determinó los diferentes niveles de los efectos estadísticos de la temperatura y el pH sobre el valor de la variable dependiente o de respuesta (sacarosa).

Tabla 15: Análisis de Varianza (ANOVA) para Sacarosa en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	410,94	1	410,94	17,49	0,0001
B:Tiempo	54,8834	1	54,8834	2,34	0,1338
C:Temperatura	1005,74	1	1005,74	42,80	0,0000
AA	1548,97	1	1548,97	65,92	0,0000
AB	1,29735	1	1,29735	0,06	0,8153
AC	103,667	1	103,667	4,41	0,0416
BB	22,8988	1	22,8988	0,97	0,3291
BC	136,995	1	136,995	5,83	0,0201
CC	6,83024	1	6,83024	0,29	0,5926
bloques	4,26727	1	4,26727	0,18	0,6721
Error total	1010,41	43	23,498		
Total (corr.)	4306,9	53			

*valores estadísticamente significativos al 5% de significancia ($p < 0.05$).

Se observa en la tabla 15 que los factores o variables independientes, pH y temperatura tuvieron un nivel de significancia lineal sobre a sacarosa a diferencia del tiempo que no tuvo un nivel de significancia, se observar que el pH tuvo efecto cuadrático en la variable sacarosa, a diferencia de la temperatura y tiempo que no tuvieron un efecto significativo sobre la experiencia. De esta misma manera se observa que las interacciones entre el pH y temperatura, tiempo y temperatura, tienen efecto significativo sobre la variable sacarosa. Como se observa el tiempo no es una variable significativa para la sacarosa, pero si lo es teniendo interacciones con la temperatura y eso se demuestra en la tabla de análisis de varianza de la sacarosa.

Con esta tabla se puede comprobar que se puede lograr obtener buenos resultados de sacarosa manejando los factores de forma independientemente o teniendo interacciones ya que tanto la temperatura y el pH tienen un efecto sobre la variable sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

El ajuste del modelo fue justificado con la variación del coeficiente de determinación R^2 , el que fue de 0.765397 para variable sacarosa en el jugo de caña clarificado por carbonatación, que se interpretó como 76.5397% de la variabilidad de la respuesta observada que se puede explicar mediante el modelo ajustado en la forma codificada.

Por otro lado el coeficiente ajustado por grados de libertad fue de 0.71741, el cual representa un valor cercano a 0.765397 que asegura el ajuste satisfactorio del modelo polinomial a los datos experimentales.

4.3.2. Diagrama de Pareto para sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

El grafico de Pareto para cada factor de estudio con su respectiva respuesta, con todos los efectos posibles estandarizados, a un nivel de confianza de 0.05, muestra que el pH (efecto cuadrático) es el primer factor que mayor influencia tuvo sobre la variable respuesta, pero teniendo un efecto negativo, seguido por la temperatura (lineal), el cual muestra efecto positivo, como tercero tenemos al pH con un efecto lineal sobre la variable sacarosa, y por último se observa las interacciones del tiempo y temperatura, pH y tiempo, tienen efecto significativo positivo para la variable sacarosa según el grafico de Pareto, por otro lado se pudo notar que el tiempo con

sus interacción (lineal y cuadrática) con el pH no tienen efecto sobre la sacarosa en el jugo de caña estudiado.

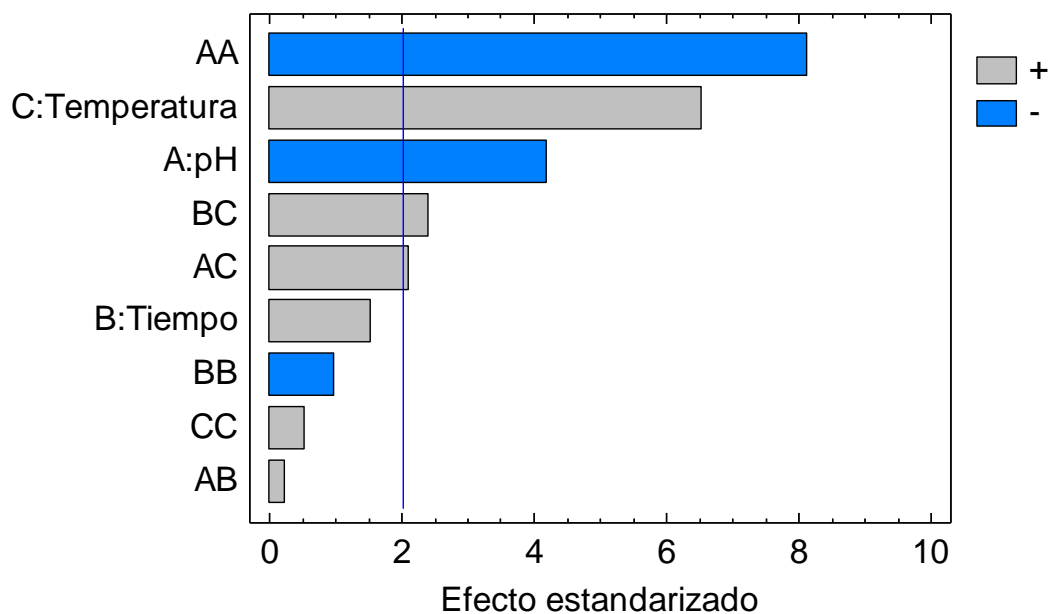


Grafico 21: Diagrama de Pareto de los factores y sus efectos estandarizados para Sacarosa en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

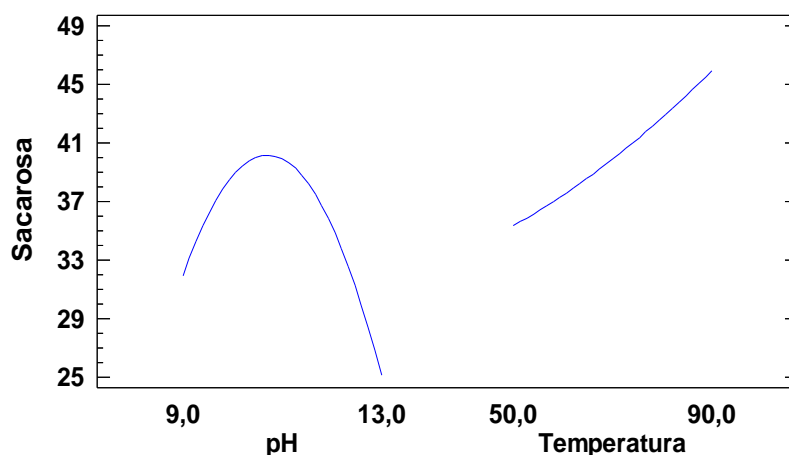


Grafico 22: Gráfico de efectos principales para Sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

Según el gráfico 22 para Sacarosa, se puede observar que el pH tiene mayor efecto, demostrando que a pH 11 se obtiene mejores resultados de sacarosa en un rango de [37-41]°S en contraste con el pH 13, el cual muestra un rango entre [25-29]°S, en donde influyo el volumen de lechada de cal agregada para llegar al pH requerido, diluyendo así el medio de jugo de caña, por otro lado la temperatura tiene mayor efecto positivo, ya que mientras mayor sea la temperatura mayor será concentración de sacarosa en el medio.

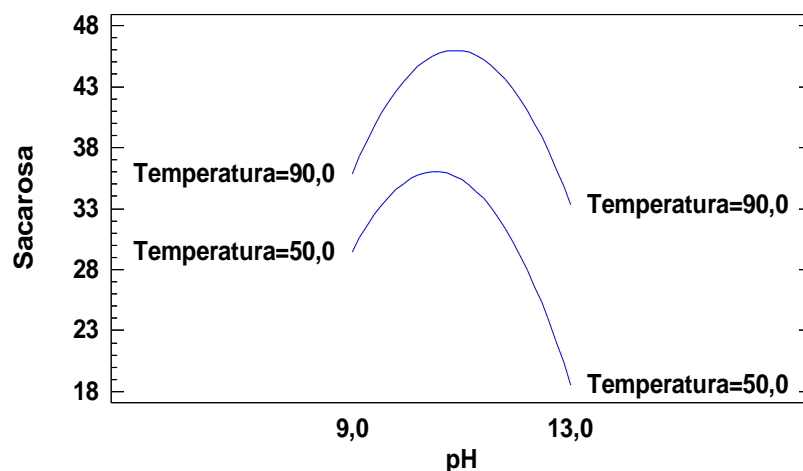


Gráfico 23: Gráfico de interacciones para °Brix en la clarificación del jugo de caña.

En el gráfico 23 para sacarosa, se observa la influencia de la interacción de la temperatura y el pH en la clarificación del jugo de caña, siendo el pH el que mayor efecto tiene sobre la sacarosa, ya que se obtendrán mejores resultados a pH 11 en comparación de pH 13, por otro lado la temperatura muestra un efecto positivo ya que se obtienen mejores resultados a pH 11 y temperatura de 90°C en contraste con la temperatura de 50°C, a diferencia del pH 13, en el cual a temperatura de 50°C no muestra resultados óptimos, demostrando que a menor temperatura influenciado por el pH se encontrara menor concentración de sacarosa, a diferencia de a temperaturas más altas en donde se obtendrán mejores resultados para sacarosa.

4.3.3. Optimización de sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

En vista de los resultados obtenidos del análisis de varianza, se obtuvo un modelo codificado representado en la siguiente ecuación, en la cual muestra las condiciones ideales para lograr el máximo valor de la variable respuesta (sacarosa).

La ecuación cuadrática que modela empíricamente la sacarosa en el proceso de clarificación que está en función de la temperatura, pH y tiempo, es la siguiente.

$$\begin{aligned} \text{Sacarosa} = & -246,95 + 56,58 * A + 1,08156 * B - 1,16861 * C \\ & - 2,84035 * A^2 + 0,02325 * A * B + 0,0519583 * A * C \\ & - 0,0552556 * B^2 + 0,0238917 * B * C + 0,00188611 * C^2 \end{aligned}$$

Donde:

A: pH

B: Tiempo (minutos)

C: Temperatura (°C)

La visualización de la ecuación del modelo predictivo puede obtenerse por el plano de superficie respuesta y por el plano de contorno el plano de superficie de respuesta es un plano teórico tridimensional que muestra la relación entre la respuesta y las variables independientes. La proyección o pantalla de dos dimensiones del plano de superficie se llama plano de contorno, las líneas de respuesta constante son trazadas en el plano de las variables independientes. Los planos de contorno ayudan a visualizar la forma de una superficie respuesta.

Estos planos dan información útil del ajuste o arreglo del modelo, pero estos no pueden representar el verdadero comportamiento del sistema.

Las respuestas para el modelo de regresión ajustado se presentaron gráficamente en las figuras a continuación. Los planos de superficie de respuesta y de contorno se generaron por la combinación de pares de los dos factores de estudio (pH y temperatura), mientras que el tiempo se excluyó al no tener significancia en los resultados.

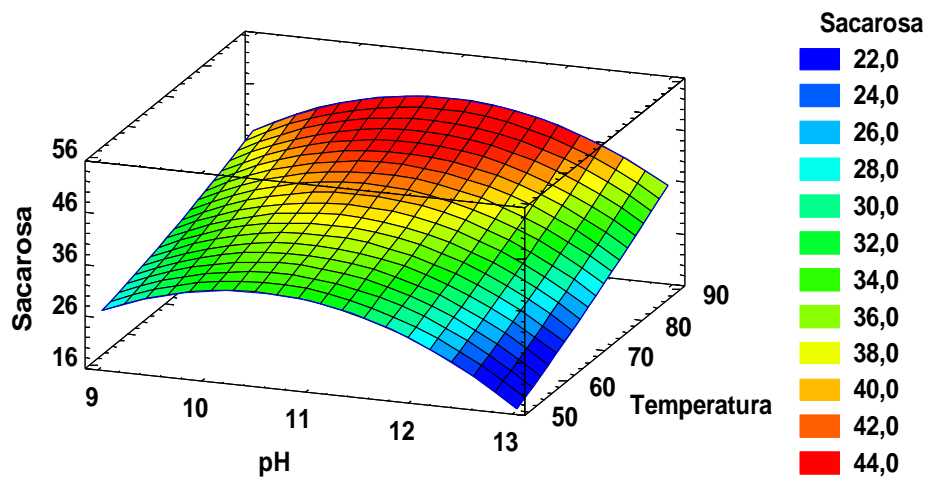


Gráfico 24: Superficie respuesta para optimizar sacarosa en el proceso de clarificación por carbonatación tomando como ejes dos de sus factores, temperatura y pH.

La figura 23, ilustra el efecto tanto del pH como la temperatura sobre la sacarosa del jugo de caña clarificado, con una concentración inicial de 32.6°S, mostrando una superficie con mínimos y máximos, y un plano de contorno que representa la interacción de estos dos factores, con líneas hiperbólicas, que confirman el punto estacionario de la figura presentada. La figura muestra que manteniendo constante el tiempo de reacción en 30 minutos, manteniendo el pH 11 y aumentando la temperatura hasta 90°C, dentro de los valores mínimos y máximos que nos muestra la superficie, la variable sacarosa tenderá a subir hasta 48.21°S. Si bien el gráfico nos muestra un máximo valor de 44 °S, la condición máxima buscada y planteada es de 48.21°S°, este valor se encuentra entre los colores rojo y anaranjado, siendo la región óptima de color rojo, la cual muestra un mayor resultado de sacarosa.

Esta investigación confirma, que tanto el pH como la temperatura, son variables significantes e importantes para la etapa de clarificación del jugo de caña, con esto se puede ver que si bien el tiempo es importante en el momento de la clarificación, ya que con el tiempo se puede observar la variación de las variables y así ver el tiempo óptimo, la sacarosa llega a un punto donde es independiente del tiempo, es decir que llega a un punto donde la sacarosa por más tiempo que se le dé, el resultado seguirá manteniendo un promedio lineal o constante. Por ello es importante el estudio de estos factores, ya que si bien estos tienen alguna interacción esta investigación nos

ayuda a conocer mejor el comportamiento de los factores, lo que nos ayuda a encontrar los valores óptimos de análisis.

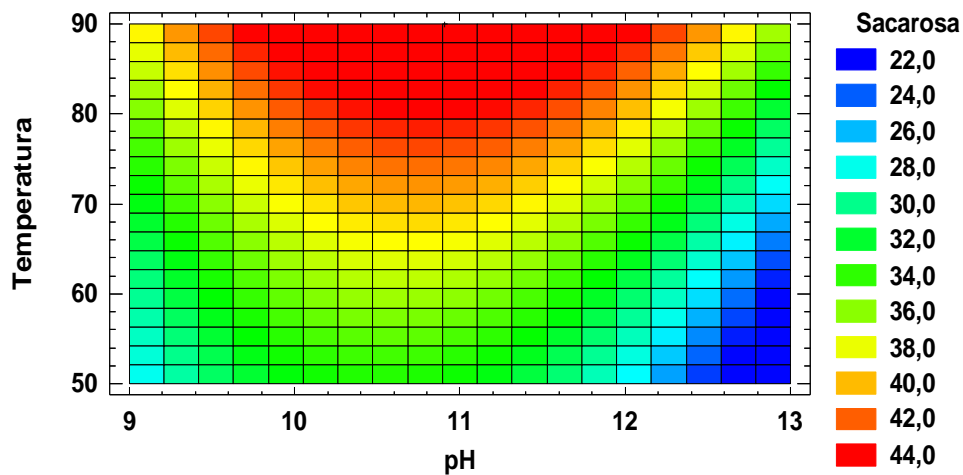


Gráfico 25: contorno de superficie respuesta para sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

Lo mencionado se puede apreciar concretamente en el gráfico de contornos de superficies de respuesta. La superficie de color anaranjado muestra la zona óptima de la sacarosa, debido a que en esta zona encontramos el mayor valor de los °Brix planteado al inicio de la investigación.

En el gráfico de contorno da a notar claramente la relación de las variables de pH y temperatura, ya que a temperatura entre [50-70]°C y a cualquier pH, la sacarosa serán mínimos, pero a mayor temperatura entre [80-90]°C y un pH 11, la sacarosa tendrán valores óptimos ya que la sacarosa es más estable a pH alcalinos, mostrando así la influencia de la temperatura, ya que a mayor temperatura y un pH de 11 se obtendrá mayor contenido de sacarosa.

Estos dos factores ya mencionados son muy importantes en proceso de elaboración de azúcar; por eso es muy importante saber manipularlos de tal manera que obtengamos los resultados requeridos asegurándonos que sean los más adecuados, es decir, los óptimos.

Ya conociendo el rango donde se encuentra los valores óptimos de los factores tratados y las ecuaciones que nos genera la superficie de respuesta; los valores óptimos encontrados fueron; un pH 10.9, tiempo de 30 minutos y temperatura de 90°C.

Tabla 16: Valores óptimos para sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	9,0	13,0	10,90
Tiempo	20,0	30,0	30,0
Temperatura	50,0	90,0	90,0

La siguiente tabla presenta los valores reales de los factores o variables independientes que dan valor óptimo de la respuesta sacarosa en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

Estos valores se encuentran dentro del rango de los niveles estudiados, el punto estacionario del modelo cuadrático ajustado, constituye un máximo de la respuesta el cual corresponde a un valor de 48.21 °S, con un pH 10.9, tiempo de 30 minutos y temperatura de 90°C.

4.4.Optimización de la Turbidez en la clarificación del jugo de caña.

4.4.1. Análisis de varianza para Turbidez

Tabla 17: Corridas experimentales para obtener Turbidez.

Tratamiento	pH	Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)	
				Experimento 1	Experimento 2
1	13	25	50	1,21	1,57
2	9	30	90	4,5	4,51
3	11	30	50	116,01	126,38
4	9	20	50	70	73
5	13	20	50	20,46	21,26
6	11	25	50	94,06	119,88
7	11	30	70	4,17	8,29
8	9	30	70	7,52	10,35
9	9	20	70	13,25	7,24
10	11	20	70	6,75	7,04
11	13	25	70	2,62	3,29
12	9	20	90	13,12	14,63
13	9	25	90	5,7	9,4
14	13	20	70	0,73	0,72
15	9	25	50	64	61,62
16	13	25	90	22,3	22,71
17	13	30	70	2,5	1,5
18	11	20	50	126,9	123,06
19	11	20	90	4,65	5,06
20	11	30	90	1,8	2,04
21	13	30	50	20,46	20,74
22	13	30	90	1,32	1,85
23	9	30	50	176,79	178,98
24	11	25	90	2,31	2,58
25	13	20	90	18,08	19,08
26	11	25	70	9,6	8,74
27	9	25	70	13,05	8,41

Para determinar el análisis de varianza con respecto a turbidez en la clarificación de jugo de caña por carbonatación se usó la tabla 17, en donde se muestran los resultados de las 27 experiencias realizadas en el laboratorio por duplicado para lograr obtener la variable respuesta (turbidez), cabe mencionar que los valores en la tabla 17 son los promedios de los últimos 6 puntos de las cinéticas mostradas en los gráficos 8, 9 y 10, ya que a partir del 5 punto la cinética de reacción es constante (Anexo 2), con estos resultados se realizaron los análisis estadísticos correspondientes a sacarosa.

El objetivo principal del análisis es el de determinar el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente, en la tabla 18, se observa el efecto que tienen los factores de temperatura, pH y tiempo sobre la sacarosa en la clarificación de jugo de caña, además se determinó los diferentes niveles de los efectos estadísticos de la temperatura y el pH sobre el valor de la variable dependiente o de respuesta (turbidez).

Tabla 18: Análisis de Varianza (ANOVA) para Turbidez en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	8485,48	1	8485,48	15,53	0,0003
B:Tiempo	573,682	1	573,682	1,05	0,3112
C:Temperatura	42718,0	1	42718,0	78,19	0,0000
AA	3113,31	1	3113,31	5,70	0,0214
AB	2060,91	1	2060,91	3,77	0,0587
AC	13640,8	1	13640,8	24,97	0,0000
BB	1260,41	1	1260,41	2,31	0,1361
BC	2888,18	1	2888,18	5,29	0,0264
CC	16176,9	1	16176,9	29,61	0,0000
bloques	7,70667	1	7,70667	0,01	0,9060
Error total	23491,1	43	546,305		
Total (corr.)	114416,	53			

*valores estadísticamente significativos al 5% de significancia ($p < 0.05$).

Se observa en la tabla 18 que los factores o variables independientes, pH y temperatura y sus interacciones tuvieron un nivel de significancia sobre la turbidez a diferencia del tiempo que no tuvo un nivel de significancia, también se puede observar que los efectos cuadráticos de los factores temperatura y pH tuvieron un efecto significativo sobre la experiencia. De esta misma manera se observa que el tiempo y la interacción con el pH y temperatura no tienen efecto significativo sobre la turbidez

Con la tabla 18 se puede comprobar que se puede obtener buenos resultados de remoción de turbidez manejando los factores de forma independientemente o teniendo interacciones ya que tanto la temperatura y el pH tienen un efecto sobre la variable sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

El ajuste del modelo fue justificado con la variación del coeficiente de determinación R^2 , el que fue de 0.794688 para la turbidez en el jugo de caña clarificado por carbonatación, que se interpretó como 79.4688% de la variabilidad de la respuesta observada que se puede explicar mediante el modelo ajustado en la forma codificada.

Por otro lado el coeficiente ajustado por grados de libertad fue de 0.752692, el cual representa un valor cercano a 0.794688 que asegura el ajuste satisfactorio del modelo polinomial a los datos experimentales.

4.4.2. Diagrama de Pareto para turbidez en la clarificación del jugo de caña.

El gráfico de Pareto para cada factor de estudio con su respectiva respuesta, con todos los efectos posibles estandarizados, a un nivel de confianza de 0.05, muestra que la temperatura (efecto lineal y cuadrático) es el primer factor que mayor influencia tuvo sobre la variable respuesta, pero solo el efecto lineal tiene un efecto negativo a diferencia el efecto cuadrático tiene efecto positivo para la remoción de turbidez, seguido por la interacción del pH y temperatura, el cual muestra efecto positivo, como tercero tenemos al pH (efecto lineal y cuadrático) sobre la turbidez, y por último se observa las interacciones del tiempo y temperatura, tienen efecto significativo positivo para la turbidez según el gráfico de Pareto, por otro lado se

pudo notar que el tiempo con sus interacción (lineal y cuadrática) con el pH no tienen efecto sobre la sacarosa en el jugo de caña estudiado.

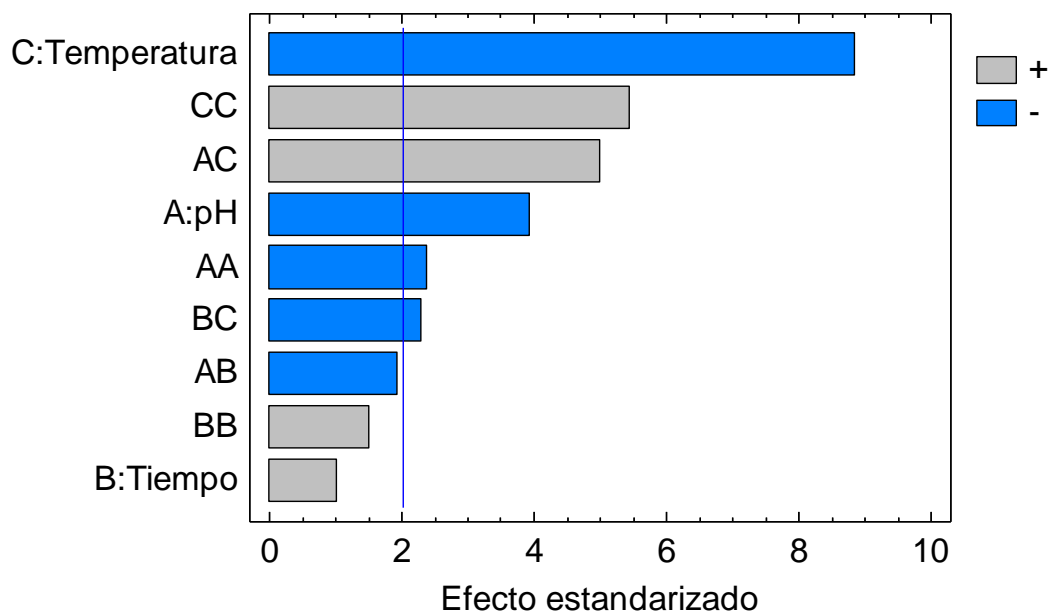


Gráfico 26: Diagrama de Pareto de los factores y sus efectos estandarizados para turbidez en la clarificación del jugo de caña..

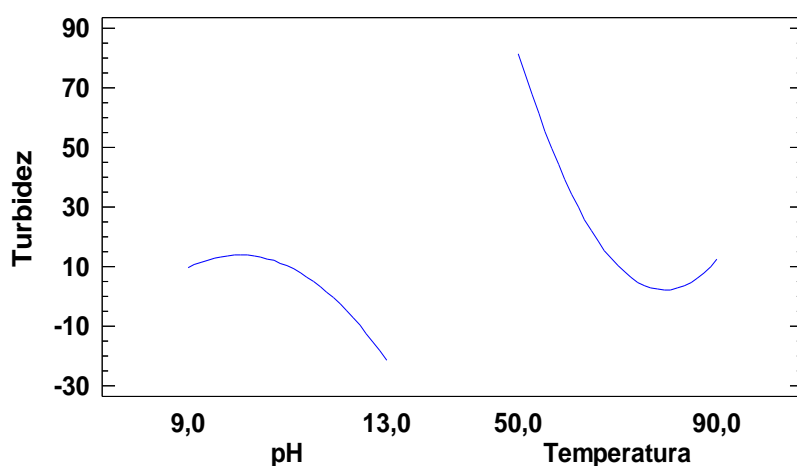


Gráfico 27: Gráfico de efectos principales para turbidez en la clarificación del jugo de caña.

Según el gráfico 27 para turbidez, se puede observar que la temperatura tiene mayor efecto, mostrando que a mayor temperatura se lograra una mejor remoción de la turbidez, por otro lado el pH tiene una influencia menor que la temperatura, pero más eficiente ya que a mayor pH la remoción de turbidez será mayor.

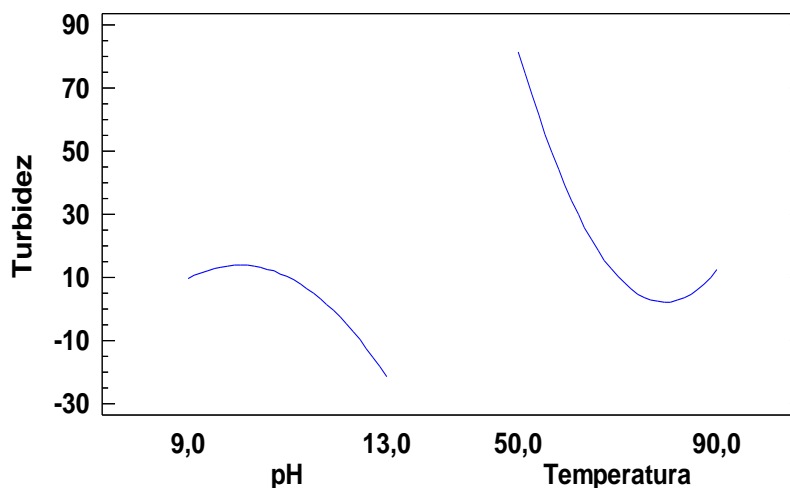


Gráfico 28: Gráfico de interacciones para turbidez en la clarificación del jugo de caña.

En el gráfico 28 para turbidez, se observa la influencia de la interacción de la temperatura y el pH en la clarificación del jugo de caña, siendo la temperatura el que mayor efecto tiene sobre la remoción de turbidez, ya que a una temperatura de 90°C se obtienen menores valores de turbidez, se observa también que el pH tiene poca influencia en las interacciones con la temperatura.

4.4.3. Optimización de turbidez en la clarificación del jugo de caña.

En vista de los resultados obtenidos del análisis de varianza, se obtuvo un modelo codificado representado en la siguiente ecuación, en la cual muestra las condiciones ideales para lograr el mínimo valor de la variable respuesta (turbidez).

La ecuación cuadrática que modela empíricamente la sacarosa en el proceso de clarificación que está en función de la temperatura, pH y tiempo, es la siguiente.

$$\begin{aligned} \text{Turbidez} = & 426,193 + 62,3593 * A - 1,8265 * B - 18,3866 * C \\ & - 4,02681 * A^2 - 0,926667 * A * B + 0,59601 * A * C \\ & + 0,409944 * B^2 - 0,1097 * B * C + 0,0917903 * C^2 \end{aligned}$$

Donde:

A: pH

B: Tiempo (min)

C: Temperatura (°C)

La visualización de la ecuación del modelo predictivo puede obtenerse por el plano de superficie respuesta y por el plano de contorno el plano de superficie de respuesta es un plano teórico tridimensional que muestra la relación entre la respuesta y las variables independientes. La proyección o pantalla de dos dimensiones del plano de superficie se llama plano de contorno, las líneas de respuesta constante son trazadas en el plano de las variables independientes. Los planos de contorno ayudan a visualizar la forma de una superficie respuesta.

Estos planos dan información útil del ajuste o arreglo del modelo, pero estos no pueden representar el verdadero comportamiento del sistema.

Las respuestas para el modelo de regresión ajustado se presentaron gráficamente en las figuras a continuación. Los planos de superficie de respuesta y de contorno se generaron por la combinación de pares de los dos factores de estudio (pH y temperatura), mientras que el tiempo se excluyó al no tener significancia en los resultados

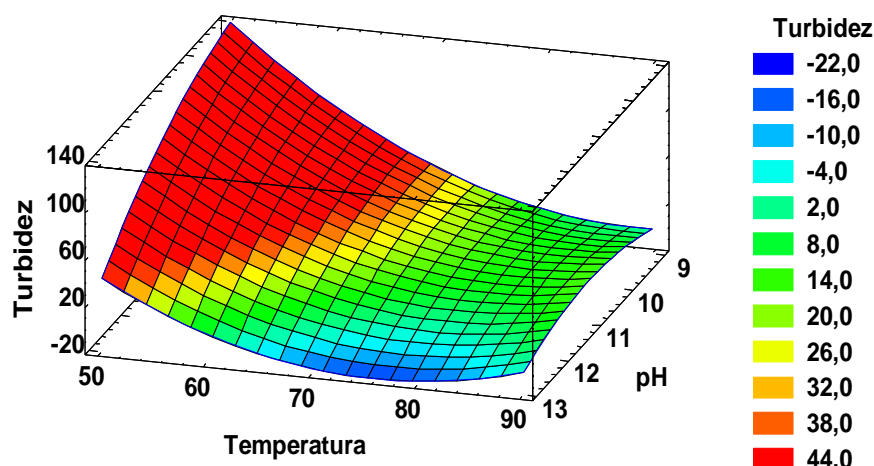


Gráfico 29: Superficie respuesta y contorno para optimizar turbidez en el proceso de clarificación por carbonatación tomando como ejes dos de sus factores, temperatura y pH.

La figura 23, ilustra el efecto tanto del pH como la temperatura sobre la turbidez del jugo de caña clarificado, con una concentración inicial de 865 NTU, mostrando una superficie con mínimos y máximos, y un plano de contorno que representa la interacción de estos dos factores, con líneas hiperbólicas, que confirman el punto estacionario de la figura presentada. La grafica muestra que manteniendo constante el tiempo de reacción en 30 minutos, manteniendo temperaturas altas y a pH alto se obtendrá mejores resultados de remoción de turbidez.

Esta investigación confirma, que tanto el pH como la temperatura, son variables significantes e importantes para la etapa de clarificación del jugo de caña, con esto se puede ver que si bien el tiempo es importante en el momento de la clarificación, ya que con el tiempo se puede observar la variación de las variables y así ver el tiempo óptimo, la turbidez llega a un punto donde es independiente del tiempo, es decir que llega a un punto donde la turbidez por más tiempo que se le dé, el resultado seguirá manteniendo un promedio lineal o constante. Por ello es importante el estudio de estos factores, ya que si bien estos tienen alguna interacción esta investigación nos ayuda a conocer mejor el comportamiento de los factores, lo que nos ayuda a encontrar los valores óptimos de análisis.

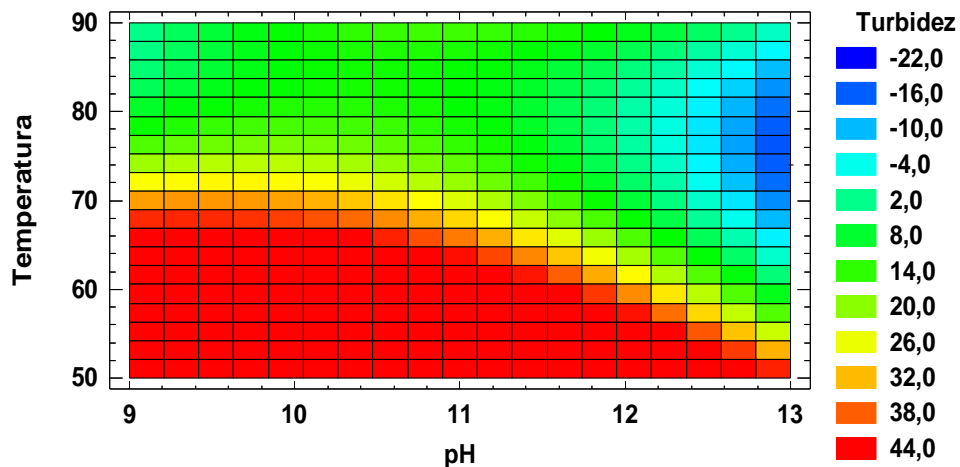


Gráfico 30: Contorno de superficie respuesta para Turbidez en la clarificación del jugo de caña.

Lo mencionado se puede apreciar concretamente en el gráfico de contornos de superficies de respuesta. La superficie de color azul muestra la zona óptima de turbidez, debido a que en esta zona encontramos la mayor remoción de turbidez planteado al inicio de la investigación.

En el gráfico de contorno da a notar claramente la relación de las variables de pH y temperatura, ya que a temperatura entre [70-80]°C y a pH entre [12-13], la remoción de turbidez será máxima, pero a menor temperatura entre [50-60]°C y a pH entre [9-11], se obtendrá valores mayores de turbidez, lo cual no es lo que se busca en esta investigación.

Estos dos factores ya mencionados son muy importantes en proceso de elaboración de azúcar; por eso es muy importante saber manipularlos de tal manera que obtengamos los resultados requeridos asegurándonos que sean los más adecuados, es decir, los óptimos.

Ya conociendo el rango donde se encuentra los valores óptimos de los factores tratados y las ecuaciones que nos genera la superficie de respuesta; los valores óptimos encontrados fueron; un pH 13, tiempo de 26 minutos y temperatura de 74°C.

Tabla 19: Valores óptimos para la remoción de turbidez en la clarificación del jugo de caña.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	9,0	13,0	13,0
Tiempo	20,0	30,0	26
Temperatura	50,0	90,0	74

La siguiente tabla presenta los valores reales de los factores o variables independientes que dan valor óptimo de la respuesta sacarosa en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

Estos valores se encuentran dentro del rango de los niveles estudiados, el punto estacionario del modelo cuadrático ajustado, constituye un máximo de la respuesta el cual corresponde a un valor de -23.19, con un pH 13, tiempo de 26 minutos y temperatura de 74°C.

4.5. Optimización de los azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.

4.5.1. Análisis de varianza para Turbidez

Tabla 20: Corridas experimentales para obtener Azúcares Reductores.

Tratamiento	pH	Tiempo (minuto)	Temperatura (°C)	Azúcares Reductores (g/l)	
				Experimento 1	Experimento 2
1	13	25	50	0,23	0,1
2	9	30	90	0,44	0,48
3	11	30	50	0,35	0,41
4	9	20	50	0,65	0,69
5	13	20	50	0,16	0,12
6	11	25	50	0,37	0,36
7	11	30	70	0,34	0,36
8	9	30	70	0,49	0,57
9	9	20	70	0,51	0,54
10	11	20	70	0,23	0,24
11	13	25	70	0,06	0,07
12	9	20	90	0,5	0,54
13	9	25	90	0,42	0,57
14	13	20	70	0,07	0,07
15	9	25	50	0,47	0,46
16	13	25	90	0,05	0,08
17	13	30	70	0,06	0,08
18	11	20	50	0,64	0,6
19	11	20	90	0,16	0,17
20	11	30	90	0,08	0,07
21	13	30	50	0,17	0,15
22	13	30	90	0,07	0,08
23	9	30	50	0,67	0,64
24	11	25	90	0,07	0,08
25	13	20	90	0,056	0,09
26	11	25	70	0,37	0,38
27	9	25	70	0,5	0,74

Para determinar el análisis de varianza con respecto a los azúcares reductores en la clarificación de jugo de caña por carbonatación se usó la tabla 20, en donde se muestran los resultados de las 27 experiencias realizadas en el laboratorio por duplicado para lograr obtener la variable respuesta (azúcares reductores), cabe mencionar que los valores en la tabla 17 son los promedios de los últimos 6 puntos de las cinéticas mostradas en los gráficos 11, 12 y 13, ya que a partir del 5 punto la cinética de reacción es constante (Anexo 2), con estos resultados se realizaron los análisis estadísticos correspondientes a los azúcares reductores.

El objetivo principal del análisis es el de determinar el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente, en la tabla 21, se observa el efecto que tienen los factores de temperatura, pH y tiempo sobre la sacarosa en la clarificación de jugo de caña, además se determinó los diferentes niveles de los efectos estadísticos de la temperatura y el pH sobre el valor de la variable dependiente o de respuesta (azúcares reductores).

Tabla 21: Análisis de Varianza (ANOVA) para azúcares reductores en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	1,241	1	1,241	111,45	0,0000
B:Tiempo	0,00603211	1	0,00603211	0,54	0,4657
C:Temperatura	0,604247	1	0,604247	54,27	0,0000
AA	0,0586135	1	0,0586135	5,26	0,0267
AB	0,00248067	1	0,00248067	0,22	0,6393
AC	0,0708507	1	0,0708507	6,36	0,0154
BB	0,0467085	1	0,0467085	4,19	0,0467
BC	0,0005415	1	0,0005415	0,05	0,8265
CC	0,0160357	1	0,0160357	1,44	0,2367
bloques	0,00675585	1	0,00675585	0,61	0,4403
Error total	0,478794	43	0,0111347		
Total (corr.)	2,53206	53			

*valores estadísticamente significativos al 5% de significancia ($p < 0.05$).

Se observa en la tabla de análisis de varianza que los factores o variables independientes, pH y temperatura y sus interacciones tuvieron un nivel de significancia sobre los azúcares reductores a diferencia del tiempo que no tuvo un nivel de significancia, también se puede observar que los efectos cuadráticos de los factores tiempo y pH tuvieron un efecto significativo sobre la experiencia. De esta misma manera se observa que el pH y la interacción con la temperatura tienen efecto significativo sobre los azúcares reductores.

Con esta tabla se puede comprobar que se puede minimizar el contenido de azúcares reductores, manejando los factores de forma independientemente o teniendo interacciones ya que tanto la temperatura y el pH tienen un efecto sobre la variable sacarosa en la clarificación del jugo de caña.

El ajuste del modelo fue justificado con la variación del coeficiente de determinación R^2 , el que fue de 0.810107 para la turbidez en el jugo de caña clarificado por carbonatación, que se interpretó como 91.0907% de la variabilidad de la respuesta observada que se puede explicar mediante el modelo ajustado en la forma codificada. Por otro lado el coeficiente ajustado por grados de libertad fue de 0.772229%, el cual representa un valor cercano a 0.810107 que asegura el ajuste satisfactorio del modelo polinomial a los datos experimentales.

4.5.2. Diagrama de Pareto para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.

El gráfico de Pareto para cada factor de estudio con su respectiva respuesta, con todos los efectos posibles estandarizados, a un nivel de confianza de 0.05, muestra que el pH es el primer factor estadísticamente significativo seguido de la temperatura, por último se encuentran las interacciones del pH y temperatura, teniendo todos los mencionados un efecto negativo para los azúcares reductores, a diferencia de los efectos cuadráticos del pH y el tiempo que tuvieron un efecto positivo.

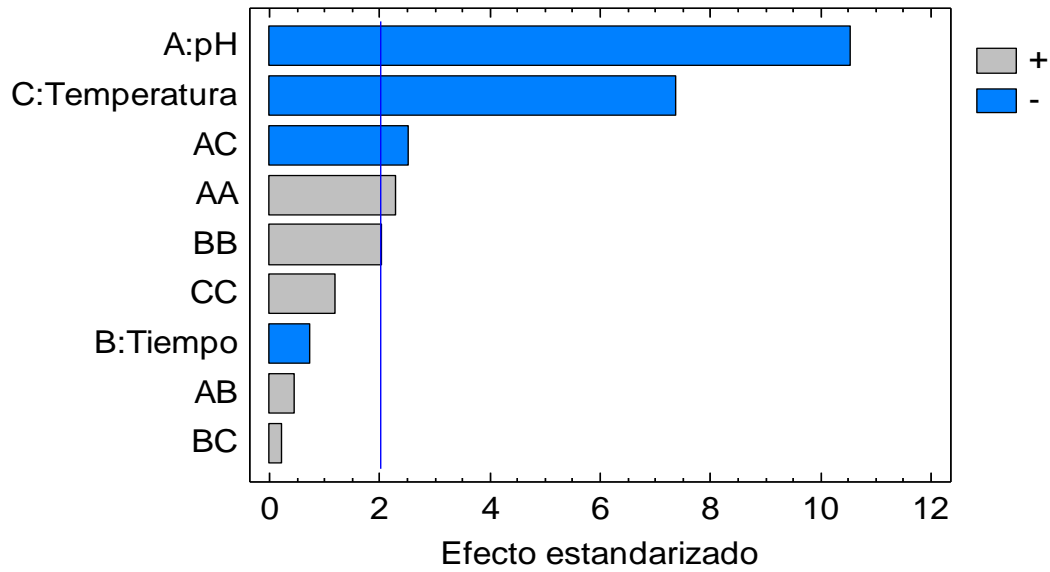


Gráfico 31: Diagrama de Pareto de los factores y sus efectos estandarizados para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.

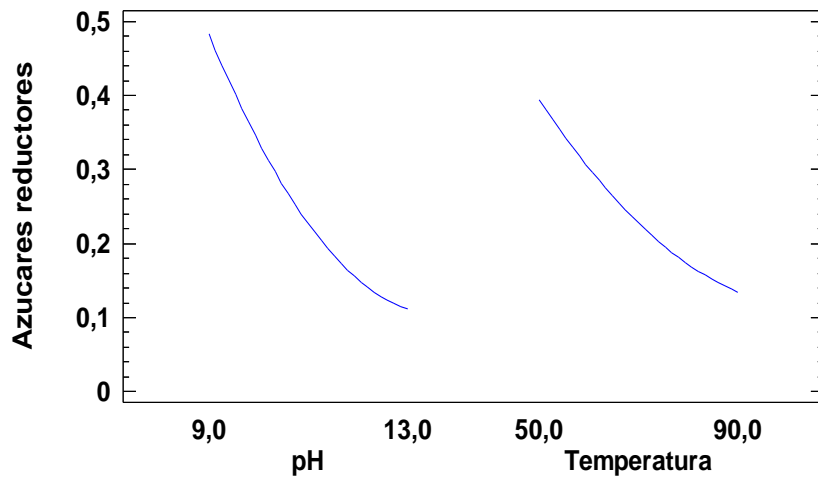


Gráfico 32: Gráfico de efectos principales para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.

Según el gráfico 32, se puede observar que la temperatura y el pH tienen mayor efecto sobre los azúcares reductores, mostrando que a mayor temperatura se lograra una

buena degradación de los azúcares reductores, por otro lado el pH tiene una influencia mayor que la temperatura y más eficiente ya que a mayor pH la degradación de los azúcares reductores será mayor.

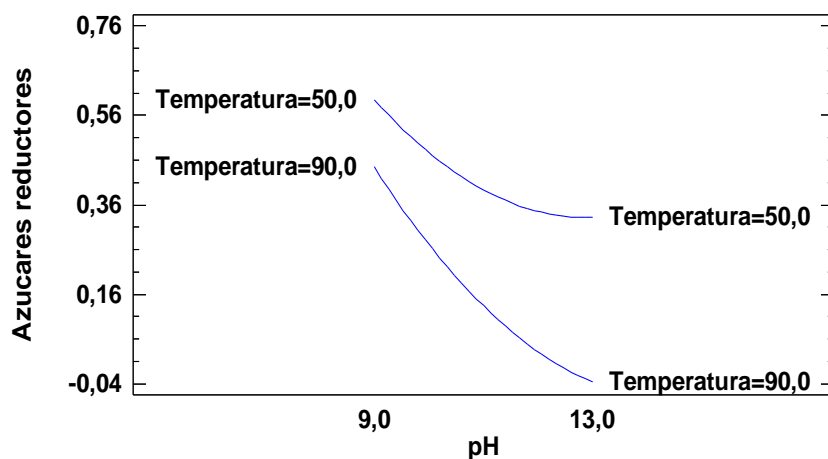


Gráfico 33: Gráfico de interacciones para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.

En el gráfico de interacciones para azúcares reductores, se observa la influencia de la interacción de la temperatura y el pH en la clarificación del jugo de caña, siendo el pH el que mayor efecto tiene sobre la degradación de los azúcares reductores, ya que a mayor pH, menor será el contenido de azúcares reductores en el medio, así mismo la temperatura tiene influencia sobre los azúcares reductores, dando resultados óptimos a temperaturas altas.

4.5.3. Optimización de los azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.

En vista de los resultados obtenidos del análisis de varianza, se obtuvo un modelo codificado representado en la siguiente ecuación, en la cual muestra las condiciones ideales para lograr el mínimo valor de la variable respuesta (azúcares reductores).

La ecuación cuadrática que modela empíricamente la sacarosa en el proceso de clarificación que está en función de la temperatura, pH y tiempo, es la siguiente.

$$\begin{aligned} \text{Azucares R.} = & 5,20516 - 0,407556 * A - 0,141875 * B - 0,00551806 * C \\ & + 0,0174722 * A^2 + 0,00101667 * A * B - 0,00135833 * A \\ & * C + 0,00249556 * B^2 + 0,0000475 * B * C \\ & + 0,0000913889 * C^2 \end{aligned}$$

Donde:

A: pH

B: Tiempo (min)

C: Temperatura (°C)

La visualización de la ecuación del modelo predictivo puede obtenerse por el plano de superficie respuesta y por el plano de contorno el plano de superficie de respuesta es un plano teórico tridimensional que muestra la relación entre la respuesta y las variables independientes. La proyección o pantalla de dos dimensiones del plano de superficie se llama plano de contorno, las líneas de respuesta constante son trazadas en el plano de las variables independientes. Los planos de contorno ayudan a visualizar la forma de una superficie respuesta.

Estos planos dan información útil del ajuste o arreglo del modelo, pero estos no pueden representar el verdadero comportamiento del sistema.

Las respuestas para el modelo de regresión ajustado se presentaron gráficamente en las figuras a continuación. Los planos de superficie de respuesta y de contorno se generaron por la combinación de pares de los dos factores de estudio (pH y temperatura), mientras que el tiempo se excluyó al no tener significancia en los resultados

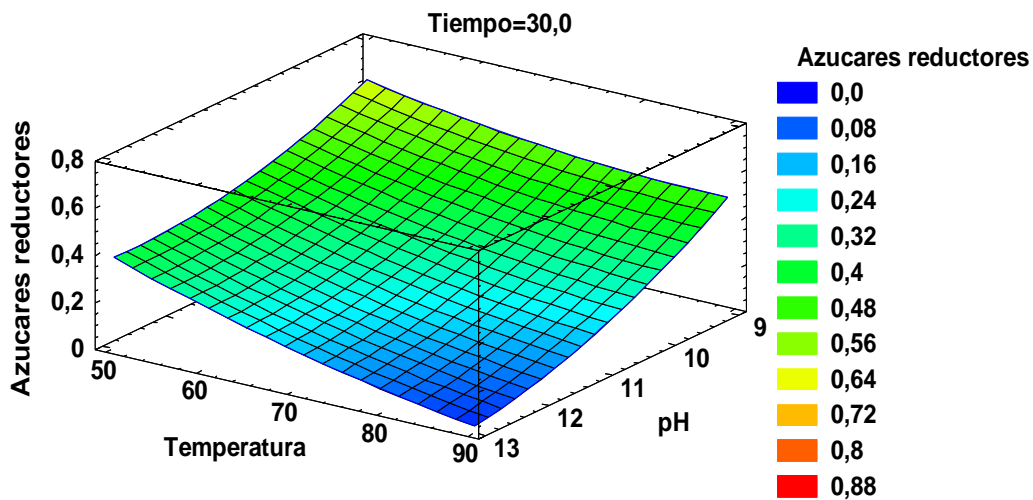


Grafico 34: Superficie respuesta y contorno para optimizar azucares reductores en el proceso de clarificación por carbonatación tomando como ejes dos de sus factores, temperatura y pH.

La grafica 34, ilustra el efecto tanto del pH como la temperatura sobre los azucares reductores del jugo de caña clarificado, con una concentración inicial de 0.75g/l, mostrando una superficie con mínimos y máximos, y un plano de contorno que representa la interacción de estos dos factores, con líneas hiperbólicas, que confirman el punto estacionario de la figura presentada. La grafica muestra que manteniendo constante el tiempo de reacción en 30 minutos, manteniendo temperaturas altas y a pH alto se obtendrá mejores resultados de degradación de azucares reductores.

Esta investigación confirma, que tanto el pH como la temperatura, son variables significantes e importantes para la etapa de clarificación del jugo de caña, con esto se puede ver que si bien el tiempo es importante en el momento de la clarificación, ya que con el tiempo se puede observar la variación de las variables y así ver el tiempo optimo, los azucares reductores llega a un punto donde es independiente del tiempo, es decir que llega a un punto donde los azucares reductores por más tiempo que se le dé, el resultado seguirá manteniendo un promedio lineal o constante. Por ello es importante el estudio de estos factores, ya que si bien estos tienen alguna interacción esta investigación nos ayuda a conocer mejor el comportamiento de los factores, lo que nos ayuda a encontrar los valores óptimos de análisis.

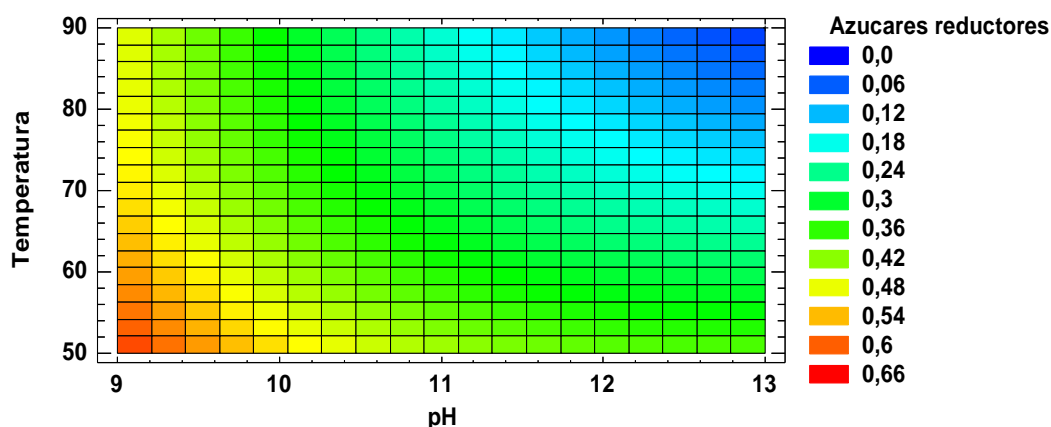


Grafico 35: Contorno de superficie respuesta para azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.

Lo mencionado se puede apreciar concretamente en el gráfico 35. La superficie de color azul muestra la zona óptima de azúcares reductores, debido a que en esta zona encontramos la mayor degradación de azúcares reductores planteado al inicio de la investigación.

En el gráfico 35 da a notar claramente la relación directa de las variables de pH y temperatura, ya que a temperatura altas entre [70-90]°C se necesita pH altos como [12-13], para obtener la máxima degradación de azúcares reductores, a diferencia de a menor temperatura entre [50-60]°C y a pH entre [9-12], se obtendrá mínima degradación de los azúcares reductores, lo cual no es lo que se busca en esta investigación.

Estos dos factores ya mencionados son muy importantes en proceso de elaboración de azúcar; por eso es muy importante saber manipularlos de tal manera que obtengamos los resultados requeridos asegurándonos que sean los más adecuados, es decir, los óptimos.

Ya conociendo el rango donde se encuentra los valores óptimos de los factores tratados y las ecuaciones que nos genera la superficie de respuesta; los valores óptimos encontrados fueron; un pH 13, tiempo de 25 minutos y temperatura de 90°C.

Tabla 22: Valores óptimos para la degradación de los azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	9,0	13,0	13,0
Tiempo	20,0	30,0	24,921
Temperatura	50,0	90,0	90,0

La tabla 22 presenta los valores reales de los factores o variables independientes que dan valor óptimo de la respuesta sacarosa en el jugo de caña clarificado por carbonatación.

Estos valores se encuentran dentro del rango de los niveles estudiados, el punto estacionario del modelo cuadrático ajustado, constituye un máximo de la respuesta el cual corresponde a un valor de -0.0357, con un pH 13, tiempo de 25 minutos y temperatura de 90.

4.6. Optimización conjunta de °Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores en la clarificación del jugo de caña por carbonatación.

Luego de haber analizado el diseño de cada variable respuesta, (°Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores) por separado, lo siguiente fue analizar el diseño aplicando la función deseabilidad la cual recoge información de los análisis mencionados anteriormente, para desarrollar la optimización en conjunto.

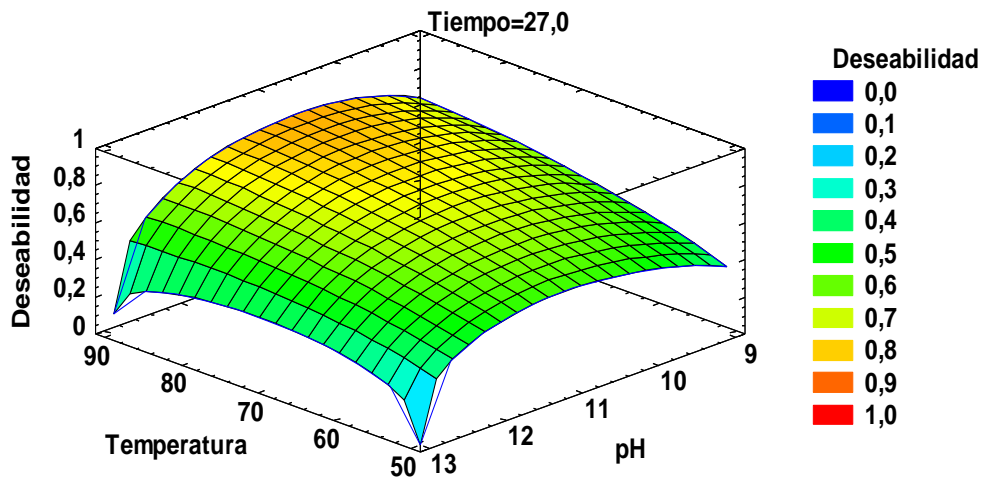


Grafico 36: Superficie respuesta para maximizar la función deseabilidad de la clarificación del jugo de caña por carbonatación.

En el grafico 36 podemos observar que la región óptima se encuentra entre los colores crema y anaranjado, en la parte superior a la izquierda donde se logra aumentar al máximo la función deseabilidad en la clarificación del jugo de caña por carbonatación, estas condiciones se dan a una temperatura de 90°C, tiempo de 27 minutos y un pH de 10.6, bajo estas condiciones se logra maximizar la función deseabilidad hasta un valor óptimo de 0,830726.

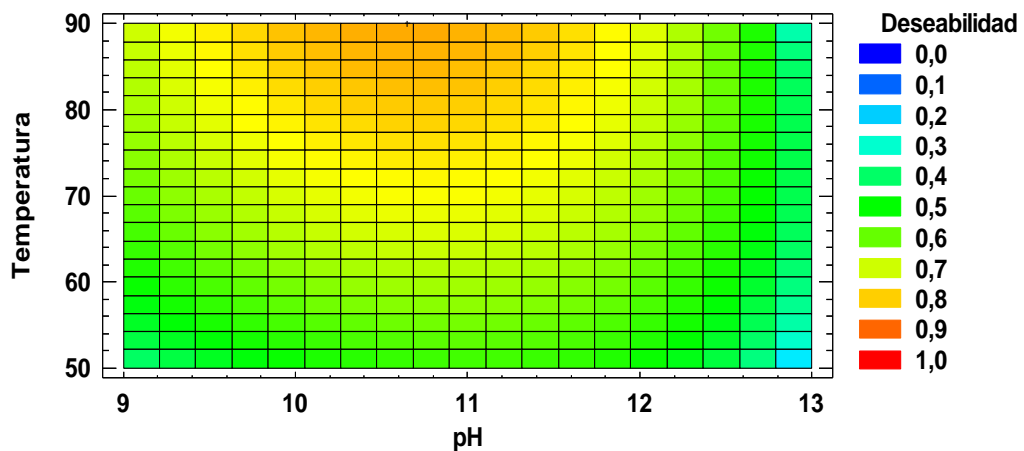


Grafico 37: Contorno de superficie respuesta para maximizar la función deseabilidad en la clarificación del jugo de caña por carbonatación.

Lo mencionado lo podemos observar concretamente en la gráfica 37, en donde se aprecia los contornos de superficie de respuesta para la función deseabilidad, de la superficie de color azul, ubicado en la parte inferior derecha de la gráfica 37, muestra la región en el plano donde se logran obtener la deseabilidad mínima, cercano a cero, lo que indica que en esa zona se encuentra el tratamiento menos eficaz; opuestamente a lo mencionado se encuentra la superficie de color anaranjado, ubicado en la parte intermedia superior del gráfico, la cual muestra la región en la superficie donde se logra obtener la deseabilidad máxima cercana a 1 (0.83), esto nos indica que en dicha región las condiciones experimentales fueron óptimas tanto de temperatura como pH y tiempo, durante el proceso de clarificación del jugo de caña por carbonatación. Es por ello que en esa región se logra optimizar las variables respuestas reportadas en la tabla 23.

Tabla 23: Condiciones óptimas de la clarificación del jugo de caña por carbonatación que logran maximizar la función deseabilidad.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	9,0	13,0	10,6471
Tiempo	20,0	30,0	27,1254
Temperatura	50,0	90,0	90,0

En la tabla 23, se puede apreciar la combinación de niveles de factores a la cual se alcanza la deseabilidad óptima de 0,830726, estos factores temperatura, pH y tiempo logran maximizar la función de “deseabilidad” en la región indicada. Estos factores minimizan los azúcares reductores y la turbidez, pero a su vez maximizan los °Brix y la sacarosa en el jugo clarificado.

Tabla 24: Valores óptimos de las variables respuesta en la clarificación de jugo de caña por carbonatación que maximiza la función deseabilidad.

Respuesta	Óptimo
°Brix	7,65777
Azúcares reductores (g/l)	0,18592
Sacarosa (°S)	47,0921
Turbidez (NTU)	10,134

En la tabla 24, se puede apreciar los valores óptimos tanto de la temperatura, tiempo y pH en la clarificación del jugo de caña por carbonatación. Estos valores fueron obtenidos maximizando la función deseabilidad, con ello se logra optimizar las variables respuesta de los °Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores. Pudimos obtener estos valores trazándonos como metas minimizar los azúcares reductores y la turbidez, así como maximizar los °Brix y la sacarosa, de esta manera obtuvimos los valores óptimos de 7.65777 °Brix, 0.18592 g/l de azúcares reductores, 47.0921 °S y 10.134 NTU, respectivamente.

De acuerdo a la función deseabilidad del programa STATGRAPHICS pudimos obtener las condiciones experimentales ideales de temperatura, pH y tiempo (90°C, 27 minutos y pH 10.6), para la cual se maximiza la deseabilidad, la misma que se basa en la optimización de las variables respuesta de los °Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores.

4.7. Validación del modelo experimental

Durante 27 minutos se siguió la cinética de los °Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores, para las condiciones optimizadas de temperatura, pH y tiempo. Los resultados fueron mostrados en la tabla 25 y las gráficas 38, 39, 40 y 41 en donde muestran que a los 27 minutos de clarificación tanto la sacarosa (36.14°S) como los °Brix (8.97) obtuvieron su máximo valor, la mayor degradación de azúcares reductores (0.22 g/l) y la remoción de turbidez (4.86 NTU equivalente a 99.4% de remoción).

Tabla 25: Reporte de los valores de las variables respuesta durante 27 minutos a las condiciones óptimas de clarificación de jugo de caña.

Tiempo (min)	pH	Brix	Sacarosa (°S)	Azúcares Reductores (g/l)	Turbidez (NTU)
0	10,6	8,00	31,30	0,68	756,30
1	10,0	8,20	33,75	0,17	4,26
1,5	9,6	8,30	35,25	0,18	5,26
2	9,0	8,28	36,15	0,20	3,03
6	8,0	8,39	36,12	0,22	5,76
10	7,6	8,45	37,48	0,23	3,67
14	7,0	8,48	38,25	0,24	3,89
18	7,0	8,63	40,45	0,20	3,50
22	6,8	8,73	43,59	0,20	3,96
25	6,8	8,79	44,78	0,21	6,01
27	6,8	8,97	44,78	0,22	4,86
Promedio		8,83	44,38	0,21	4,94
Diferencia		1,0	13,5	-0,5	-751,4

Gráficas de los reportes de las variables respuesta durante 27 minutos a las condiciones óptimas de clarificación de jugo de caña

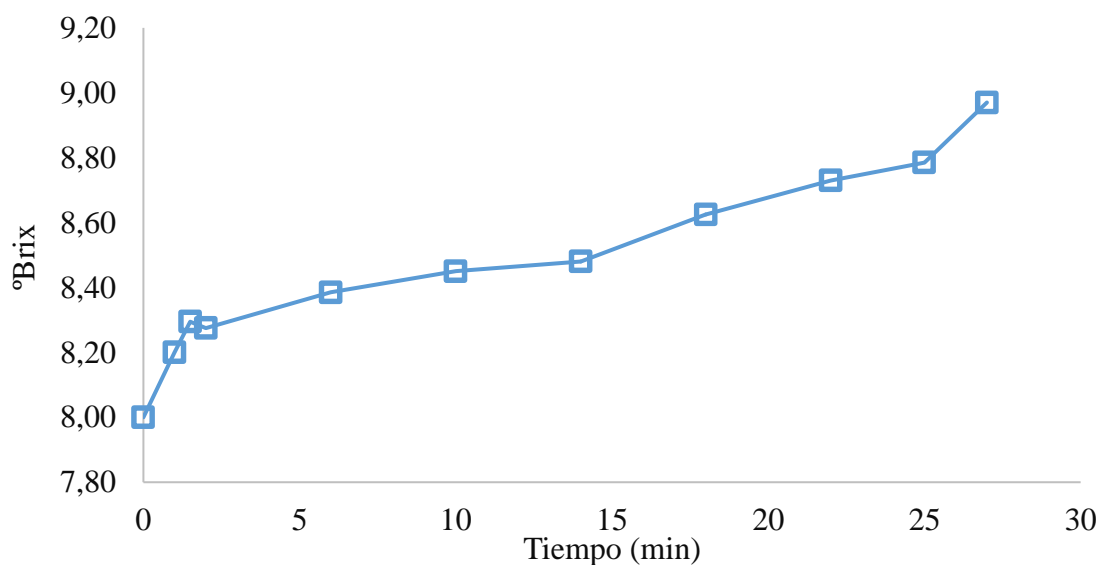


Gráfico 38: Cinética de °Brix para las condiciones de clarificación de jugo de caña óptima de 90°C, 27 minutos y pH 10.6.

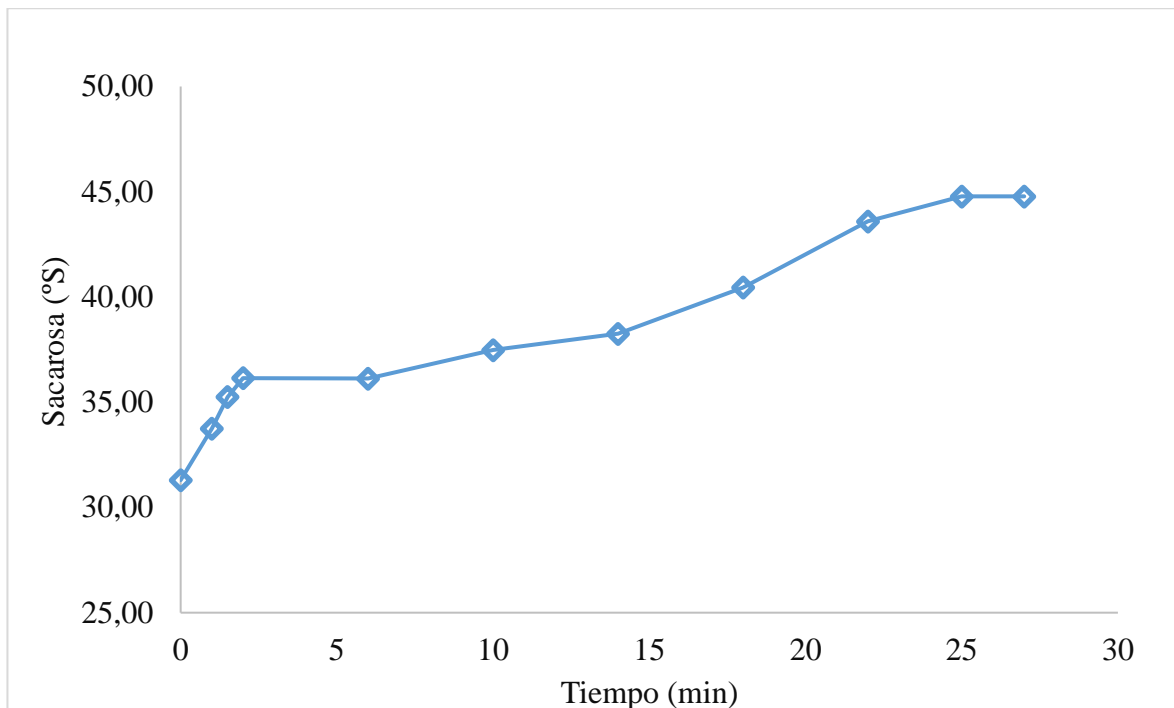


Grafico 39: Cinética de sacarosa para las condiciones de clarificación de jugo de caña óptima de 90°C, 27 minutos y pH 10.6.

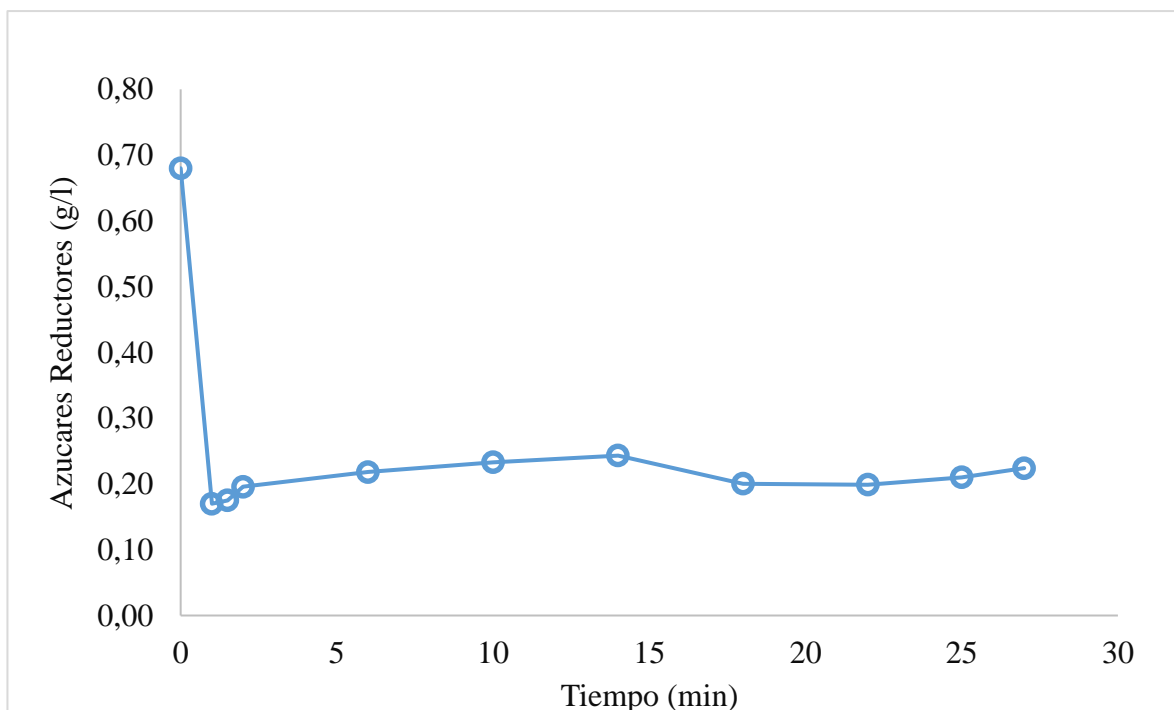


Grafico 40: Cinética de azucares reductores para las condiciones de clarificación de jugo de caña óptima de 90°C, 27 minutos y pH 10.6.

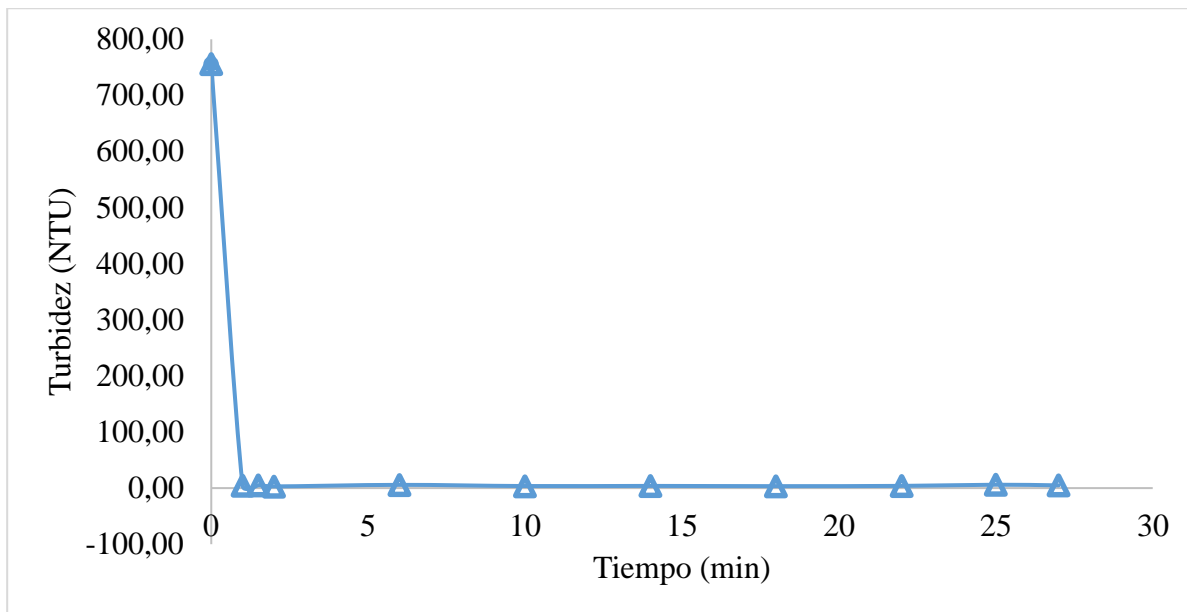


Grafico 41: Cinética de turbidez para las condiciones de clarificación de jugo de caña óptima de 90°C, 27 minutos y pH 10.6.

Tabla 26: Valores óptimos con margen de error de las variables respuestas en la clarificación del jugo de caña que maximizan la deseabilidad.

Resultados de la validación	Valor predicho	Valor Obtenido	Desviación
°Brix	7,65777	8,83	0,82889178
Sacarosa (°S)	47,0921	44,38	1,9177443
Turbidez (NTU)	10,134	4,94	3,67271262
Azucares Reductores (g/l)	0,18592	0,21	0,01702713

Estos resultados muestran que los valores actuales de °Brix (8.83) no fue un valor muy cercano al valor predicho (7.65777) , siendo el valor obtenido mejor que el predicho; el contenido de sacarosa obtenido (44.38) fue un valor muy cercano al valor predicho(47.0921), la turbidez se obtuvieron mejores valores (4.94 NTU) que el valor predicho (10.134 NTU), y por último en el contenido de azucares reductores fue menor que el obtenido (0.21 g/l)pero cercano al predicho el predicho (0.18592 g/l), siendo este un valor negativo, ya que lo que se necesita es minimizar el contenido de azucares reductores en el medio.

En resumen la ecuación aplicada es el adecuado ya que se obtienen mejores valores de °Brix, valores cercanos al contenido de sacarosa, y mayor remoción de turbidez, siendo los azúcares reductores un valor negativo pero cercano al valor predicho,

4. Conclusiones

- El pH de 9,11 y 13; y temperaturas de 50, 70 y 90 °C influyen en las cinéticas de reacción de las variables dependientes: turbidez y azúcares reductores que presentan la misma tendencia representadas por el modelo Medilli: $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ ajustado con los valores $[a=850, k=5, n=50 \text{ y } b=1.5]$ para turbidez con $R^2: 0.79$, $[a=0.7, k=-0.5, n= 0.006 \text{ y } b= 0.001]$ para azúcares reductores con $R^2: 0.85$, la cinética de sacarosa presentan el mismo modelo pero diferentes valores de sus constantes modelo 1: $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ ajustado con los valores $[a= 32.47, k= 0.19, n=0.007, b= 0.001]$ con $R^2: 0.89$ y modelo 2 ajustado con los valores $[a= 31, k= -0.2, n=0.09, b= 0.01]$ con $R^2:0.87$; la cinética de °Brix presentan el mismo modelo pero diferentes valores de sus constantes modelo 1: $[y = a * \exp(-kt^n) + b * t]$ ajustado con los valores $[a= 7.996, k= 0.029, n= 0.192, b= 0.01]$ con $R^2:0.78$ y modelo 2 ajustado con los valores $[a= 8, k= -0.2, n=- 0.19, b= 0.019]$ con $R^2:0.82$.
- El jugo de caña de variedad México – 73, presenta las características fisicoquímicas de $16 \pm 0.3^\circ\text{Brix}$, $60.8 \pm 0.8 \text{ }^\circ\text{S}$, $0.73 \pm 0.2 \text{ g/l}$ de azúcares reductores y $1830 \pm 7.1 \text{ NTU}$; demostrando que hay una variación con las zonas de cultivo.
- Los máximo resultados de °Brix =7.65 y sacarosa = 47.09 °S y los mínimo valores de azúcares reductores = 0.18 g/l y turbidez=10.13NTU, son predichos con pH de 10.64, tiempo de 27 minutos y temperatura de 90°C, mediante el diseño factorial 3^k (Design - DOE, ($3^k(k-p)$)), compuesto de $3k$ experimentos, siendo $k = 3$ (variables), validado con los resultados obtenidos $8.83 \text{ }^\circ\text{Brix}$ con una desviación de 0.82%, 44.38°S con desviación de 1.91%, 4.94 NTU con desviación de 3.67% y 0.21 g/l de azúcares reductores, comprueban que el modelo de regresión aplicado es el adecuado con respecto a los datos obtenidos.
- Se demostró que por el método de carbonatación se obtienen mejores resultados de $2.04 \text{ }^\circ\text{Brix}$, siendo mayor en comparación con el método de sulfitación utilizado por san Jacinto, se obtuvo 34.7% más de contenido de sacarosa en el medio, un mínimo contenido 0.21 g/l de azúcares reductores a diferencia del mínimo contenido que indica san Jacinto de 0.8 g/l de azúcares reductores, a la vez se obtuvo 4.94 NTU el cual está debajo del mínimo presentado por san Jacinto de 2000 NTU en su proceso de clarificación por el método de sulfitación.

5. Recomendaciones

Realizar un estudio de las variables estudiadas a pH alcalino constante

Realizar un estudio de almidón, dureza cálcica, fosfato y color ICUMSA con el proceso de carbonatación, siendo estas importantes en la calidad del jugo de caña.

Realizar la carbonatación del jugo de caña de azúcar utilizando CO₂ bajo alta presión, para permitir una mejor condición de mezcla y evitar pérdidas excesivas del gas.

Cristalizar el caldo aclarado por carbonatación y evaluar las características del azúcar obtenido.

Comparar el efecto de las variables estudiadas en el proceso de clarificación del caldo de caña de azúcar por carbonatación; pH, tiempo y temperatura, al proceso de sulfitación.

6. Referencias bibliográficas

- ADRIÁN, J. (2005).** Proceso de elaboración de azúcar. (Tesis pregrado). Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú.
- ANDRADE, A. R. P. (1998),** Tratamento do caldo. Manual técnico da usina de açúcar Santa Terezinha. Santana do Paraíba, São Paulo.
- AOKI, I. V. (1987),** Clarificação de caldos de cana: comparação entre os processos de sulfitação e carbonatação. 177 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo..
- AOKI, I.V.; TAVARES, F.A. (1986).** Carbonatação de açúcares brutos brasileiros: fatores que influenciam e verificação da eficiência pela medida de cor. STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, v. 5, p. 37-39.
- ATKINS, P.; DE PAULA, J. (2002).** Físico-Química: vol. II. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC.
- BENNETT, M.C. (1973),** Flocculation process in sugar manufacturing. International Sugar Journal, v. 75, p. 101-109..
- BRIONES, PUTSCH CO., (2007),** Comparison of carbonatation and phosphatation process for clarification of sugar solutions, a technical review to assist decision making over the appropriate clarification process for new sugar refineries.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D.C. (2003).** Planejamento de experimentos usando o *Statistica*. Rio de Janeiro. E-Papers.
Carbonatação.
- CARDONA QUINTANA, (2013),** Estudio de un caso en la industria azucarera, en relación con el proceso de clarificación del jugo de la caña, en base a una técnica alternativa para la sulfitación convencional, Guatemala
- CASTRO, P. (2015).** Determinación de la concentración de almidón por caracterización espectrofotométrica en el jugo de caña de azúcar de las variedades: CP72-2086, CP88-1165 Y CP73-1547 utilizadas en el ingenio trinidad Guatemala. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- CESAR, M.A.; DELGADO, A.A.; CAMARGO, A.P.; BISSOLI, B.M.A.; SILVA, F.C. (1987),** Capacidade de fosfatos naturais e artificiais em elevar o teor de fósforo no caldo de cana-de-açúcar (cana-planta), visando o processo industrial. STAB: açúcar, álcool e subprodutos, v.5, n. 5, p. 32-38..
- CHAO, I.R.S. (2006).** Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) Escola

Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- CHEN, J.C.P.; CHOU, C. (1993).** Cane Sugar Handbook. A manual for cane sugar manufacturers and their chemists. 12nd.ed. New York John Wiley & Sons.
- CHOU, C.C.; IQBAL, K.; MIN, Y. G.; GAO, D.W.; DUFFAUT, E. (2006).** **SAT CLARKE & EDYE, EGGLESTON, (1998),** Sucrose decomposition in aqueous solution, and losses in sugar manufacture and refining
- CLARKE, M.A. (1996)** Systems for production of white sugars. Zuckerindustrie, v. 121, n. 7, p. 505-510.
- COMISION VERACRUZANA DE COMERCIALIZACION AGR. (2004).**
- COPERSUCAR – COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA. (2001),** Manual de controle químico da fabricação de açúcar. Piracicaba.
- COPERSUCAR, (1987),** Apostila do curso de Engenharia Açucareira – Processo de fabricação do açúcar – Parte I. Centro de Tecnologia Copersucar – CTC. Copersucar, Piracicaba.
- DANTAS DE ARAUJO, (2005),** tratamento de clarificação do caldo caña pelo método de bicarbonato.
- DELGADO, A. A.; AZEREDO CÉSAR, M. A., (1977),** Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana. Vol. II. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- DOHERTY W.O.S.; EDYE L.A. (1999).** An overview on the chemistry of clarification of cane sugar juice. Proceedings Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists.
- DOHERTY, W. O. S.; RACKEMANN, D. W. (2008).** Stability of sugarcane juice – a preliminary assessment of the colorimetric method used for phosphate analysis. Zuckerindustrie, v. 133, n. 1, p. 24-30.
- Eduardo Casanova Cabeza, Oscar Almazán del Olmo, Marianela Cordovés Herrera, Jorge Lodos Fernández. (2017)** Tecnología Azucarera conocimientos y practica productiva
- EDYE, (2001),** An overview of sucrose degradation , Australia
- EGGLESTON & J. R. VERCELLOTTI, (2008),** Degradation of sucrose, glucose and fructose in concentrated aqueous solutions under constant ph. conditions at elevated temperature.
- EL-KADER, A.A.; MANSOUR, A.E.K.; YASSIN, A.A., (1983),** Influence of clarification on sugar cane juice by the sulphitation and phosphatation

processes. In: International Society of Sugar-Cane Technologists, 18, 1983, Cuba. Proceedings. Cuba, p. 507- 530.

ESCUDERO JARAMILLO, FRED MIGUEL, (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.”

Fabiane Hamerski Arislete Dantas de Aquino y Papa Matar Ndiaye. (2011). Clarificação do caldo de cana-de-açúcar por carbonatação – ensaios preliminares.

FERREIRA FILHO, S. S. (0996), Importância do mecanismo de transferência externa de massa em sistema filtros - adsorvedores. 581 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

García H. Albarracin L. Toscano A. Santana N. Insuasty O. (2007). Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Social. Colombia.

GIRALDO, M. (2005). Evaluación del efecto de materia extraña vegetal (hojas, cogollos, chulquines) en el proceso de clarificación de jugos de caña de azúcar. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Agroindustrial. Palmira, Colombia.

HAMERSKI, F. (2009), Estudio de variables en el proceso de carbonatación del caldo de caña de azúcar. 148 f. Disertación (Maestría en Tecnología de Alimentos) - Universidad Federal de Paraná, Curitiba,.

HONIG, P. (1953), Principles of sugar technology. New York: Elsevier Publishing Company, v. 1.

HUGOT, E.,(1977),Manual da Engenharia Açucareira. São Paulo: Mestre Jou, v.1. impurities and industrial cane juices. International Sugar Journal, v.97, n. 1163, p. 633-639.

JEREZ LÓPEZ. (2008), Control de la inversión de la sacarosa en el proceso de elaboración de jarabe simple de bebidas carbonatadas, Guatemala.

JOURANI, A.; BOUNAHMIDI, T. (1995) The kinetics of calcium phosphate precipitation in clarification. II. Sucrose solutions with Mg²⁺ and SO₄²⁻

LARRAHONDO J. (1995). Calidad de la caña de azúcar. CENICANA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, Colombia.

MANTELATTO, P. E. (2005). Estudo do processo de cristalização de soluções impuras de sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento. 272 p. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

- MARÍN L. (2012).** Determinación de las condiciones apropiadas de preparación de un floculante como componente fundamental en el proceso de clarificación de jugo en Riopaila Castilla S.A., Planta Riopaila. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Tecnología química, Pereira Risaralda.
- MATOS FAVERO, (2011),** clarificação do caldo de cana-de-açúcar pelo processo de
- Miceli G.F., 2002.** Regulación enzimática de la acumulación de sacarosa en cañas de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agrociencia*. 411-419.
- MOODLEY, (2001),** Laboratory optimisation of the carbonatation process with regard to colour removal at the malelane refinery
- MOODLEY, M.; SCHORN, P.M.; WALTHER, D.C.; MASSINGA, P. (2003)** Optimasing the carbonatation process. *International Sugar Journal*, v. 105, n. 1249, p. 24-28.
- PARANHOS, S. B. (1987)** Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Fundação Cargil, Campinas – SP, v. 1, 431p.
- PAYNE, J. H. (1989)** Operações unitárias na produção de açúcar de cana. São Paulo: Nobel: STAB, , 245 p.
- process as a replacemant for sulfitation in mill white sugar production. *International Sugar Journal*, v. 108, n. 1289, p. 247-253.
- RIVAS OBREGÓN, (2012),** Estudio experimental de la incidencia del coagulante, floculante y tiempo de sedimentación en el proceso de clarificación de jugo a escala de laboratorio para la elaboración de azúcar blanco especial.
- RUAS, T.C.B.G. (1993).** O ácido sulfuroso na sulfitação do caldo misto das usinas açucareiras. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- SOUZA, J. (1988)** Estudo da eficiência de alguns polielitrólitos utilizados na clarificação do caldo de cana. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- THAI, (2013),** Studies on the clarification of juice from whole sugar cane crop.

7. Anexo

Anexo 1

Determinación de la curva de calibrado para azúcares reductores

Tabla 27: valores de absorbancia por diferentes diluciones de glucosa.

Nº tubo	Glucosa (ul)	DNS (ul)	Agua Destilada (ul)	Concentración (g/l)
1	25	500	475	0.1
2	50	500	450	0.2
3	75	500	425	0.3
4	100	500	400	0.4
5	125	500	375	0.5
6	150	500	350	0.6
BLANCO	0	500	500	0

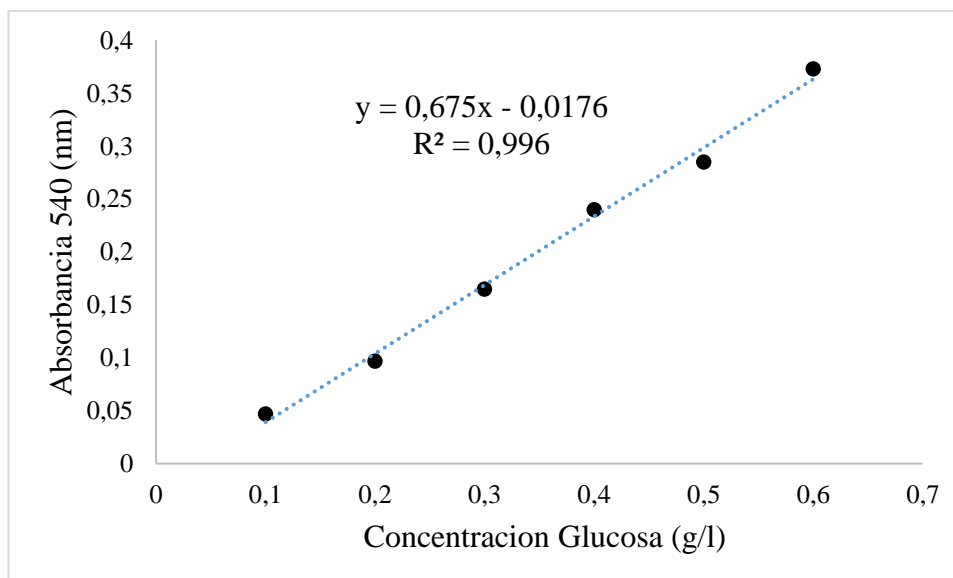


Gráfico 42: curva de calibrado de glucosa.

Ecuación de la curva de calibrado lineal ajustado:

$$\text{Abs} = 0,675 * \text{Concentración glucosa} - 0,0176$$

Anexo 2

Resultado: Tablas de °Brix

Tabla 28: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 9, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 – T: 50°C - t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 – T: 50°C - t: 25 min			Tiempo (min)	pH 9 – T: 50°C - t: 20 min		
	Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8,00	8,00	8,00	0	8,00	8,00	8,00	0	8,00	8,00	8,00
1	7,30	8,93	8,12	1	9,00	7,57	8,28	1	8,10	8,09	8,10
1,5	7,51	8,95	8,23	1,5	9,13	7,53	8,33	1,5	8,10	8,09	8,10
2	7,87	8,95	8,41	2	9,07	7,75	8,41	2	8,11	8,12	8,12
6	8,69	8,98	8,84	5	8,99	8,20	8,60	4	8,09	8,21	8,15
10	8,72	8,92	8,82	8	8,94	8,29	8,61	6	8,30	8,15	8,22
14	8,72	8,94	8,83	11	8,86	8,33	8,60	8	8,18	8,30	8,24
18	8,70	8,91	8,81	14	8,86	8,41	8,64	11	8,02	8,32	8,17
22	8,82	8,89	8,85	17	8,89	8,45	8,67	14	8,08	8,30	8,19
26	8,91	8,82	8,86	21	8,79	8,71	8,75	17	8,17	8,30	8,23
30	8,99	8,82	8,91	25	8,77	8,67	8,72	20	8,10	8,30	8,20

Tabla 29: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 9, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 – T: 70°C - t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 – T: 70°C - t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 – T: 70°C - t : 20 min		
	Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8	8	8	0	8	8	8	0	8	8	8
1	8,33	8,28	8,31	1	8,20	8,26	8,23	1	8,10	8,10	8,10
1,5	8,35	8,36	8,36	1,5	8,20	8,36	8,28	1,5	8,10	8,10	8,10
2	8,37	8,37	8,37	2	8,25	8,37	8,31	2	8,11	8,09	8,10
6	8,35	8,45	8,40	5	8,26	8,42	8,34	4	8,12	8,12	8,12
10	8,33	8,44	8,39	8	8,27	8,40	8,34	6	8,10	8,11	8,11
14	8,33	8,46	8,40	11	8,25	8,42	8,34	8	8,13	8,13	8,13
18	8,33	8,45	8,39	14	8,25	8,38	8,32	11	8,11	8,11	8,11
22	8,34	8,46	8,40	17	8,28	8,42	8,35	14	8,10	8,11	8,11
26	8,35	8,44	8,40	21	8,25	8,39	8,32	17	8,13	8,14	8,13
30	8,34	8,48	8,41	25	8,23	8,41	8,32	20	8,14	8,14	8,14

Tabla 30: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 9, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo pH 9 –T: 90°C - t : 30 min				Tiempo pH 9 –T: 90°C - t : 25 min				Tiempo pH 9 –T: 90°C - t : 20 min			
(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio	(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio	(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8	8	8	0	8	8	8	0	8	8	8
1	8,35	8,30	8,33	1	8,21	8,19	8,20	1	8,07	8,07	8,07
1,5	8,37	8,33	8,35	1,5	8,26	8,21	8,23	1,5	8,17	8,17	8,17
2	8,39	8,37	8,38	2	8,27	8,23	8,25	2	8,19	8,18	8,18
6	8,48	8,50	8,49	5	8,27	8,25	8,26	4	8,17	8,25	8,21
10	8,36	8,60	8,48	8	8,30	8,32	8,31	6	8,17	8,31	8,24
14	8,47	8,55	8,51	11	8,29	8,35	8,32	8	8,20	8,33	8,27
18	8,52	8,62	8,57	14	8,28	8,37	8,32	11	8,24	8,34	8,29
22	8,51	8,60	8,56	17	8,32	8,34	8,33	14	8,25	8,35	8,30
26	8,52	8,65	8,59	21	8,33	8,36	8,34	17	8,24	8,35	8,30
30	8,67	8,64	8,65	25	8,35	8,34	8,34	20	8,29	8,35	8,32

Tabla 31: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 11, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo pH 11 –T: 50°C - t : 30 min				Tiempo pH 11 –T: 50°C - t : 25 min				Tiempo pH 11 –T: 50°C - t : 20 min			
(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio	(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio	(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8,00	8,00	8,00	0	8,00	8,00	8,00	0	8,00	8,00	8,00
1	8,32	7,37	7,84	1	8,08	7,86	7,97	1	7,90	7,90	7,90
1,5	8,26	7,38	7,82	1,5	8,11	7,80	7,95	1,5	7,87	7,87	7,87
2	8,27	7,35	7,81	2	8,10	7,78	7,94	2	7,83	7,88	7,86
6	8,29	7,23	7,76	5	8,09	7,75	7,92	4	7,80	7,81	7,81
10	8,27	7,27	7,77	8	8,08	7,74	7,91	6	7,80	7,83	7,82
14	8,27	7,25	7,76	11	8,07	7,73	7,90	8	7,75	7,86	7,81
18	8,27	7,23	7,75	14	8,07	7,76	7,92	11	7,74	7,85	7,80
22	8,26	7,20	7,73	17	8,07	7,71	7,89	14	7,73	7,81	7,77
26	8,23	7,24	7,73	21	8,04	7,72	7,88	17	7,74	7,81	7,78
30	8,20	7,23	7,72	25	7,71	8,00	7,86	20	7,72	7,80	7,76

Tabla 32: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 11, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo pH 11 –T: 70°C - t : 30 min				Tiempo pH 11 –T: 70°C - t : 25 min				Tiempo pH 11 –T: 70°C - t : 20 min			
(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio	(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio	(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8	8	8	0	8	8	8	0	8	8	8
1	7,64	7,37	7,50	1	7,95	7,85	7,90	1	7,58	7,68	7,63
1,5	7,36	7,15	7,25	1,5	7,58	7,71	7,65	1,5	7,30	7,45	7,38
2	7,42	6,97	7,20	2	7,62	7,63	7,62	2	7,20	7,32	7,26
6	7,41	6,97	7,19	5	7,62	7,59	7,61	4	7,21	7,28	7,24
10	7,44	6,97	7,20	8	7,67	7,58	7,62	6	7,22	7,3	7,26
14	7,48	6,96	7,22	11	7,65	7,59	7,62	8	7,23	7,3	7,27
18	7,47	6,91	7,19	14	7,63	7,57	7,60	11	7,20	7,26	7,23
22	7,43	7,05	7,24	17	7,65	7,55	7,60	14	7,25	7,28	7,26
26	7,40	7,04	7,22	21	7,60	7,56	7,58	17	7,23	7,29	7,26
30	7,39	7,02	7,21	25	7,62	7,58	7,60	20	7,22	7,29	7,26

Tabla 33: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 11, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo pH 11 –T: 90°C - t : 30 min				Tiempo pH 11 –T: 90°C - t : 25 min				Tiempo pH 11 –T: 90°C - t : 20 min			
(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio	(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio	(min)	Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8	8	8	0	8	8	8	0	8	8	8
1	7,71	6,90	7,30	1	7,54	7,60	7,57	1	7,38	7,40	7,39
1,5	6,94	6,56	6,75	1,5	7,14	7,45	7,30	1,5	6,83	7,00	6,91
2	6,85	6,63	6,74	2	7,12	7,14	7,13	2	6,80	6,85	6,83
6	6,92	5,88	6,40	5	7,16	7,25	7,21	4	6,80	6,52	6,66
10	6,89	6,03	6,46	8	7,19	7,29	7,24	6	6,82	6,52	6,67
14	6,93	6,03	6,48	11	7,20	7,29	7,25	8	6,82	6,54	6,68
18	6,94	6,00	6,47	14	7,20	7,27	7,24	11	6,83	6,53	6,68
22	6,90	5,85	6,38	17	7,21	7,29	7,25	14	6,81	6,45	6,63
26	6,95	5,95	6,45	21	7,16	7,30	7,23	17	6,81	6,51	6,66
30	6,91	6,08	6,50	25	7,18	7,25	7,22	20	6,81	6,55	6,68

Tabla 34: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 13, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 50°C t : 20 min		
	Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8,00	8,00	8,00	0	8,00	8,00	8,00	0	8,00	8,00	8,00
1	5,54	5,54	5,54	1	6,06	6,06	6,06	1	7,73	7,73	7,73
1,5	4,78	4,78	4,78	1,5	5,55	5,75	5,65	1,5	6,77	6,77	6,77
2	4,50	4,50	4,50	2	5,12	5,12	5,12	2	6,37	6,37	6,37
6	4,54	4,60	4,57	5	5,14	5,23	5,19	4	6,29	6,40	6,35
10	4,65	4,70	4,67	8	5,22	5,30	5,26	6	6,45	6,10	6,28
14	4,61	4,65	4,63	11	5,22	5,21	5,22	8	6,43	6,50	6,47
18	4,60	4,67	4,64	14	5,25	5,33	5,29	11	6,38	6,29	6,34
22	4,61	4,70	4,65	17	5,19	5,30	5,25	14	6,31	6,21	6,26
26	4,60	4,65	4,63	21	5,23	5,30	5,26	17	6,35	6,50	6,42
30	4,60	4,65	4,63	25	5,23	5,38	5,31	20	6,33	6,40	6,37

Tabla 35: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 13, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 20 min		
	Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8	8	8	0	8	8	8	0	8	8	8
1	4,98	5,00	4,99	1	5,18	5,21	5,20	1	5,48	5,51	5,50
1,5	4,57	4,55	4,56	1,5	4,78	4,85	4,82	1,5	5,12	5,16	5,14
2	4,45	4,48	4,47	2	4,62	4,71	4,67	2	4,99	5,00	4,99
6	4,18	4,41	4,30	5	4,57	4,60	4,59	4	4,47	4,84	4,65
10	4,20	4,45	4,33	8	4,54	4,56	4,55	6	4,48	4,80	4,64
14	4,21	4,42	4,32	11	4,60	4,50	4,55	8	4,46	4,80	4,63
18	4,22	4,39	4,31	14	4,58	4,58	4,58	11	4,46	4,83	4,64
22	4,15	4,42	4,29	17	4,63	4,53	4,58	14	4,46	4,83	4,65
26	4,29	4,41	4,35	21	4,59	4,55	4,57	17	4,46	4,82	4,64
30	4,18	4,46	4,32	25	4,56	4,56	4,56	20	4,46	4,81	4,63

Tabla 36: Valores de la cinética de los °Brix a pH: 13, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 20 min		
	Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio		Brix ₁	Brix ₂	Promedio
0	8	8	8	0	8	8	8	0	8	8	8
1	5,25	5,25	5,25	1	5,54	5,59	5,57	1	5,70	5,64	5,67
1,5	4,60	4,58	4,59	1,5	5,20	5,20	5,20	1,5	5,29	5,29	5,29
2	4,47	4,47	4,47	2	5,10	5,09	5,09	2	5,21	5,21	5,21
6	4,47	4,27	4,37	5	4,75	4,45	4,60	4	5,13	4,85	4,99
10	4,50	4,40	4,45	8	4,85	4,41	4,63	6	5,07	4,73	4,90
14	4,46	4,32	4,39	11	4,89	4,40	4,65	8	5,04	4,77	4,91
18	4,50	4,25	4,38	14	4,80	4,39	4,60	11	4,95	4,73	4,84
22	4,50	4,09	4,30	17	4,66	4,42	4,54	14	4,87	4,69	4,78
26	4,49	4,10	4,29	21	4,42	4,51	4,47	17	4,85	4,79	4,82
30	4,47	4,15	4,31	25	4,51	4,50	4,51	20	4,80	4,87	4,84

Resultado: Tablas de Sacarosa

Tabla 37: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 9, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	32,18	32,22	32,20	0	32,12	32,16	32,14	0	32,08	32,12	32,10
1	27,95	27,95	27,95	1	28,95	30,00	29,48	1	29,05	33,00	31,03
1,5	27,50	27,62	27,56	1,5	29,00	29,31	29,16	1,5	27,89	32,45	30,17
2	27,20	27,20	27,20	2	29,35	28,00	28,68	2	28,80	31,66	30,23
6	25,55	25,22	25,39	5	27,40	29,00	28,20	4	30,10	30,01	30,06
10	25,20	25,14	25,17	8	29,40	28,58	28,99	6	28,60	30,21	29,41
14	27,25	25,01	26,13	11	27,05	28,74	27,90	8	30,70	29,55	30,13
18	24,95	25,93	25,44	14	28,65	28,00	28,33	11	28,25	31,00	29,63
22	27,30	25,36	26,33	17	26,60	29,71	28,16	14	30,00	29,65	29,83
26	25,45	25,88	25,67	21	28,80	28,41	28,61	17	28,50	30,11	29,31
30	26,45	25,49	25,97	25	29,00	29,77	29,39	20	30,65	29,77	30,21

Tabla 38: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 9, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	31,27	31,31	31,29	0	31,1	31,3	31,20	0	31,27	31,29	31,28
1	31,82	32,15	31,99	1	32,24	32,28	32,26	1	32,57	32,42	32,50
1,5	31,62	32,35	31,99	1,5	32,15	32,38	32,27	1,5	32,15	32,88	32,52
2	31,65	32,28	31,97	2	31,61	32,88	32,25	2	32,10	33,14	32,62
6	31,30	33,00	32,15	5	31,56	33,25	32,41	4	32,89	32,55	32,72
10	30,92	33,53	32,23	8	31,35	33,72	32,54	6	31,70	33,81	32,76
14	30,98	33,60	32,29	11	31,60	34,30	32,95	8	32,30	34,01	33,16
18	31,07	33,72	32,40	14	31,62	34,44	33,03	11	32,47	34,25	33,36
22	31,14	33,80	32,47	17	31,69	34,55	33,12	14	31,10	35,77	33,44
26	31,25	33,81	32,53	21	31,70	34,80	33,25	17	31,65	35,15	33,40
30	31,90	33,98	32,94	25	32,95	34,89	33,92	20	32,40	35,41	33,91

Tabla 39: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 9, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	33,07	33,12	33,10	0	33,4	33,5	33,45	0	33,24	33,18	33,21
1	32,67	32,89	32,78	1	32,41	33,00	32,71	1	33,12	32,11	32,62
1,5	32,70	33,00	32,85	1,5	32,00	33,45	32,73	1,5	33,10	32,24	32,67
2	33,12	33,12	33,12	2	32,10	33,55	32,83	2	33,18	32,21	32,70
6	33,89	33,48	33,69	5	32,18	34,01	33,10	4	33,09	32,77	32,93
10	34,48	33,59	34,04	8	32,09	34,44	33,27	6	33,04	33,25	33,15
14	34,67	33,70	34,19	11	31,98	34,68	33,33	8	33,27	33,20	33,24
18	34,73	33,62	34,18	14	32,19	34,72	33,46	11	33,19	33,40	33,30
22	34,79	33,79	34,29	17	32,07	34,74	33,41	14	33,30	33,46	33,38
26	34,84	33,81	34,33	21	32,07	34,80	33,44	17	33,23	33,58	33,41
30	34,79	33,72	34,26	25	32,09	34,85	33,47	20	33,31	33,59	33,45

Tabla 40: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 11, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	31,15	31,2	31,18	0	31,2	31,4	31,30	0	31,26	31,32	31,29
1	36,59	35,62	36,11	1	33,65	33,65	33,65	1	33,45	33,45	33,45
1,5	38,45	39,40	38,93	1,5	34,45	34,45	34,45	1,5	33,51	33,51	33,51
2	39,15	40,10	39,63	2	34,40	34,40	34,40	2	33,50	33,52	33,51
6	39,00	38,56	38,78	5	34,72	36,12	35,42	4	33,54	33,60	33,57
10	38,61	39,01	38,81	8	34,58	35,97	35,28	6	33,53	33,59	33,56
14	38,49	38,59	38,54	11	34,65	36,00	35,33	8	33,50	33,60	33,55
18	39,00	38,65	38,83	14	34,47	35,92	35,20	11	33,50	33,58	33,54
22	38,59	37,89	38,24	17	34,57	35,92	35,25	14	33,50	33,60	33,55
26	38,52	37,98	38,25	21	34,39	35,87	35,13	17	33,51	33,57	33,54
30	38,62	38,00	38,31	25	34,17	35,68	34,93	20	33,49	33,55	33,52

Tabla 41: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 11, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	33	33,24	33,12	0	33,07	33,12	33,10	0	33,20	33,1	33,15
1	39,12	38,88	39,00	1	40,25	44,85	42,55	1	39,25	44,07	41,66
1,5	38,25	39,75	39,00	1,5	41,25	42,57	41,91	1,5	40,15	49,53	44,84
2	38,24	39,86	39,05	2	42,10	41,77	41,94	2	41,26	48,38	44,82
6	37,45	42,55	40,00	5	41,12	42,93	42,02	4	40,26	47,84	44,05
10	38,25	41,99	40,12	8	40,32	43,22	41,77	6	40,29	46,53	43,41
14	39,24	42,76	41,00	11	39,45	44,37	41,91	8	40,55	45,09	42,82
18	40,12	41,88	41,00	14	40,35	43,19	41,77	11	40,36	44,74	42,55
22	40,25	37,75	39,00	17	41,25	42,25	41,75	14	40,25	48,77	44,51
26	38,15	43,85	41,00	21	42,10	41,24	41,67	17	40,57	44,13	42,35
30	40,00	40,00	40,00	25	41,12	40,53	40,82	20	40,36	42,88	41,62

Tabla 42: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 11, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	34,12	34,38	34,25	0	33,4	33,17	33,29	0	35,10	35,38	35,24
1	51,60	51,60	51,60	1	52,60	52,60	52,60	1	39,00	39,00	39,00
1,5	52,90	52,90	52,90	1,5	52,80	52,80	52,80	1,5	38,86	38,86	38,86
2	52,60	52,60	52,60	2	52,70	52,70	52,70	2	38,90	38,65	38,78
6	52,90	53,35	53,13	5	52,70	52,80	52,75	4	39,00	38,00	38,50
10	51,50	51,94	51,72	8	52,90	52,78	52,84	6	39,02	37,78	38,40
14	52,80	52,94	52,87	11	52,80	52,70	52,75	8	38,95	37,89	38,42
18	51,70	51,55	51,63	14	52,96	53,10	53,03	11	39,00	37,79	38,40
22	52,20	52,07	52,13	17	52,80	53,00	52,90	14	39,00	37,89	38,45
26	51,20	51,91	51,56	21	53,00	53,20	53,10	17	39,00	37,89	38,45
30	46,40	46,85	46,62	25	53,10	53,00	53,05	20	39,07	37,96	38,52

Tabla 43: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 13, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 50°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	28,78	29,5	29,14	0	30	30	30,00	0	32,10	31,16	31,63
1	17,55	17,55	17,55	1	18,10	22,25	20,18	1	23,90	23,90	23,90
1,5	18,20	18,20	18,20	1,5	18,35	21,56	19,96	1,5	23,10	24,01	23,56
2	17,65	17,65	17,65	2	18,75	20,14	19,45	2	24,50	22,15	23,33
6	17,95	18,20	18,08	5	20,30	19,40	19,85	4	22,65	23,10	22,88
10	18,85	19,10	18,98	8	19,30	18,74	19,02	6	24,45	23,15	23,80
14	17,50	17,95	17,73	11	20,80	20,10	20,45	8	22,25	23,15	22,70
18	18,10	18,70	18,40	14	18,90	18,30	18,60	11	22,20	22,76	22,48
22	18,60	19,66	19,13	17	20,50	20,10	20,30	14	23,25	24,21	23,73
26	17,95	17,80	17,88	21	20,25	19,70	19,98	17	22,35	22,48	22,42
30	18,05	18,10	18,08	25	19,60	19,40	19,50	20	23,40	23,65	23,53

Tabla 44: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 13, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	30,05	29,45	29,75	0	27,86	31,2	29,53	0	29,78	30,46	30,12
1	20,21	21,22	20,72	1	19,65	19,65	19,65	1	22,23	20,12	21,18
1,5	19,89	20,45	20,17	1,5	19,70	19,70	19,70	1,5	21,28	21,15	21,22
2	21,28	21,32	21,30	2	20,55	20,55	20,55	2	22,00	20,56	21,28
6	20,35	19,67	20,01	5	19,20	20,09	19,64	4	18,80	19,25	19,03
10	20,12	19,00	19,56	8	19,32	19,10	19,21	6	18,24	19,00	18,62
14	20,24	19,81	20,03	11	19,32	20,21	19,77	8	19,40	19,41	19,41
18	20,19	19,68	19,93	14	19,36	19,60	19,48	11	19,50	19,75	19,63
22	19,38	20,12	19,75	17	19,30	19,55	19,43	14	19,45	20,89	20,17
26	19,19	18,89	19,04	21	19,40	18,30	18,85	17	18,97	19,72	19,35
30	20,18	20,68	20,43	25	20,15	20,87	20,51	20	20,20	20,49	20,35

Tabla 45: Valores de la cinética de Sacarosa a pH: 13, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 20 min		
	(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio		(°S) ₁	(°S) ₂	Promedio
0	32,15	31,61	31,88	0	31,05	29,51	30,28	0	31,42	31,78	31,60
1	33,80	34,15	33,98	1	34,60	34,60	34,60	1	35,30	32,00	33,65
1,5	32,10	36,00	34,05	1,5	32,25	36,15	34,20	1,5	37,00	31,48	34,24
2	30,90	37,48	34,19	2	34,90	34,90	34,90	2	36,40	30,88	33,64
6	34,80	38,45	36,63	5	29,20	36,00	32,60	4	30,50	35,14	32,82
10	39,00	37,46	38,23	8	32,15	35,75	33,95	6	37,80	32,88	35,34
14	36,10	36,41	36,26	11	32,99	29,17	31,08	8	37,30	32,10	34,70
18	37,40	36,24	36,82	14	30,10	33,56	31,83	11	30,60	33,99	32,30
22	35,70	36,56	36,13	17	34,60	32,00	33,30	14	30,95	35,10	33,03
26	36,20	36,41	36,31	21	36,90	28,45	32,68	17	36,56	32,00	34,28
30	37,60	36,45	37,03	25	30,10	33,00	31,55	20	29,60	35,00	32,30

Resultado: Tablas de Turbidez

Tabla 46: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 9, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	862,12	860,54	861,33	0	864,57	861,83	863,20	0	890,25	833,75	862,00
1	10,45	10,45	10,45	1	12,47	13,59	13,03	1	12,60	12,00	12,30
1,5	68,45	68,45	68,45	1,5	12,60	12,00	12,30	1,5	11,50	10,20	10,85
2	182,50	182,50	182,50	2	11,50	10,20	10,85	2	42,90	41,00	41,95
6	190,00	190,78	190,39	5	42,90	41,00	41,95	4	65,00	58,80	61,90
10	186,50	195,00	190,75	8	56,60	54,80	55,70	6	64,00	67,00	65,50
14	200,00	200,98	200,49	11	45,50	45,57	45,53	8	65,10	60,00	62,55
18	198,50	197,52	198,01	14	70,55	47,90	59,23	11	77,07	86,20	81,64
22	167,50	169,00	168,25	17	77,50	77,60	77,55	14	83,05	89,13	86,09
26	163,00	170,00	166,50	21	82,29	82,97	82,63	17	63,80	59,85	61,83
30	132,00	129,60	130,80	25	72,68	81,54	77,11	20	72,00	90,00	81,00

Tabla 47: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 9, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	880,67	861,69	871,18	0	890,45	869,91	880,18	0	870,25	861,11	865,68
1	15,35	15,00	15,18	1	13,20	11,30	12,25	1	19,10	4,23	11,67
1,5	5,18	5,18	5,18	1,5	13,20	11,30	12,25	1,5	13,30	5,46	9,38
2	5,86	7,73	6,80	2	11,24	9,30	10,27	2	17,50	5,63	11,57
6	8,21	10,30	9,25	5	11,25	10,50	10,88	4	12,50	6,47	9,49
10	7,79	9,90	8,84	8	13,47	11,30	12,39	6	18,25	6,72	12,49
14	6,90	8,55	7,73	11	15,57	8,70	12,14	8	10,30	6,91	8,61
18	4,79	9,90	7,35	14	21,54	9,31	15,43	11	12,39	7,26	9,83
22	11,90	14,00	12,95	17	9,65	6,65	8,15	14	12,65	7,52	10,09
26	6,36	12,00	9,18	21	6,03	4,35	5,19	17	13,55	7,83	10,69
30	6,72	7,80	7,26	25	13,85	8,04	10,95	20	13,10	7,99	10,55

Tabla 48: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 9, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	832,15	852,77	842,46	0	880,35	920,15	900,25	0	825,36	936,6	880,98
1	4,52	4,54	4,53	1	46,90	46,90	46,90	1	24,75	24,75	24,75
1,5	3,65	3,65	3,65	1,5	27,20	27,20	27,20	1,5	14,85	14,85	14,85
2	3,61	3,61	3,61	2	10,28	10,28	10,28	2	9,70	9,70	9,70
6	4,06	4,95	4,50	5	5,64	10,40	8,02	4	11,05	12,25	11,65
10	4,23	4,96	4,59	8	5,91	10,86	8,38	6	12,95	14,45	13,70
14	4,37	4,79	4,58	11	6,30	9,73	8,01	8	12,30	12,55	12,43
18	4,33	4,43	4,38	14	5,85	8,95	7,40	11	12,85	11,96	12,41
22	5,01	5,00	5,01	17	5,82	9,81	7,81	14	16,25	18,55	17,40
26	4,89	3,70	4,29	21	5,68	7,49	6,58	17	13,80	16,60	15,20
30	4,65	3,75	4,20	25	4,68	8,58	6,63	20	12,65	16,05	14,35

Tabla 49: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 11, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	870,36	799,76	835,06	0	900,89	929,81	915,35	0	900,35	880,35	890,35
1	50,40	60,25	55,33	1	57,50	60,00	58,75	1	67,50	60,26	63,88
1,5	66,98	62,32	64,65	1,5	54,07	65,23	59,65	1,5	74,25	59,56	66,91
2	55,85	70,12	62,99	2	52,88	52,23	52,56	2	52,88	79,78	66,33
6	86,20	86,55	86,38	5	90,20	84,20	87,20	4	123,21	120,35	121,78
10	124,32	128,90	126,61	8	91,15	97,00	94,08	6	130,26	130,74	130,50
14	139,03	145,60	142,32	11	96,65	94,20	95,43	8	131,32	124,43	127,88
18	131,50	153,49	142,50	14	94,95	98,24	96,60	11	125,39	122,19	123,79
22	134,24	146,60	140,42	17	95,84	115,95	105,90	14	122,84	119,14	120,99
26	104,00	130,53	117,27	21	94,12	105,60	99,86	17	126,84	123,47	125,16
30	92,75	93,00	92,88	25	95,48	99,50	97,49	20	128,45	121,11	124,78

Tabla 50: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 11, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	900,56	856,14	878,35	0	869,65	755,91	812,78	0	900,26	800,88	850,57
1	34,10	34,10	34,10	1	28,85	28,85	28,85	1	43,70	43,70	43,70
1,5	6,66	6,66	6,66	1,5	3,21	3,21	3,21	1,5	9,89	9,89	9,89
2	2,83	2,83	2,83	2	3,47	3,47	3,47	2	2,14	2,14	2,14
6	4,03	6,03	5,03	5	6,91	5,56	6,24	4	6,66	5,73	6,20
10	2,95	5,45	4,20	8	14,80	13,57	14,19	6	4,04	7,12	5,58
14	3,41	4,25	3,83	11	7,76	6,87	7,31	8	3,73	3,79	3,76
18	5,07	12,55	8,81	14	10,15	9,82	9,99	11	11,15	10,62	10,89
22	4,40	12,40	8,40	17	8,36	10,23	9,30	14	4,78	5,71	5,25
26	5,36	10,36	7,86	21	8,66	7,42	8,04	17	8,32	9,11	8,71
30	3,97	6,97	5,47	25	10,60	7,68	9,14	20	8,59	7,18	7,89

Tabla 51: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 11, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	813,78	987,28	900,53	0	856,81	743,71	800,26	0	870,89	835,27	853,08
1	18,40	17,45	17,93	1	14,40	14,15	14,28	1	20,30	20,30	20,30
1,5	7,99	8,37	8,18	1,5	4,91	4,85	4,88	1,5	17,00	17,00	17,00
2	3,50	2,14	2,82	2	1,32	1,28	1,30	2	1,90	1,90	1,90
6	1,50	2,39	1,94	5	3,57	4,02	3,79	4	3,26	4,15	3,71
10	1,41	2,13	1,77	8	2,15	2,59	2,37	6	3,43	4,68	4,05
14	1,58	2,00	1,79	11	1,58	1,72	1,65	8	3,86	4,31	4,09
18	2,20	2,30	2,25	14	1,85	1,70	1,77	11	4,74	5,60	5,17
22	1,92	1,91	1,91	17	1,83	1,70	1,76	14	6,47	7,53	7,00
26	2,29	1,09	1,69	21	2,86	3,57	3,21	17	5,11	3,86	4,49
30	1,73	2,44	2,08	25	2,33	2,78	2,55	20	5,67	5,31	5,49

Tabla 52: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 13, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

pH 13 –T: 50°C				pH 13 –T: 50°C				pH 13 –T: 50°C			
Tiempo (min)	t : 30 min			Tiempo (min)	t : 25 min			Tiempo (min)	t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	789,86	982,44	886,15	0	750,68	873,6	812,14	0	900,46	840,46	870,46
1	16,90	16,90	16,90	1	6,26	6,26	6,26	1	16,90	16,90	16,90
1,5	18,25	20,16	19,21	1,5	8,27	8,27	8,27	1,5	1192,00	25,23	18,14
2	12,30	12,30	12,30	2	3,70	3,70	3,70	2	12,30	12,30	12,30
6	51,50	51,95	51,73	5	4,77	5,66	5,22	4	51,50	52,35	51,93
10	25,20	25,95	25,58	8	0,75	1,75	1,25	6	25,20	27,55	26,38
14	12,45	11,87	12,16	11	0,46	0,39	0,43	8	12,45	13,70	13,08
18	10,15	10,71	10,43	14	0,61	0,70	0,66	11	10,15	10,39	10,27
22	15,90	16,86	16,38	17	0,58	0,90	0,74	14	15,90	17,25	16,58
26	16,00	15,55	15,78	21	0,55	0,50	0,53	17	16,00	15,44	15,72
30	12,05	12,30	12,18	25	0,76	1,10	0,93	20	12,05	13,57	12,81

Tabla 53: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 13, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

pH 13 –T: 70°C				pH 13 –T: 70°C				pH 13 –T: 70°C			
Tiempo (min)	t : 30 min			Tiempo (min)	t : 25 min			Tiempo (min)	t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	856,69	996,25	926,47	0	900,65	790,63	845,64	0	800,12	703,84	751,98
1	6,44	6,43	6,44	1	8,05	8,04	8,04	1	4,83	4,83	4,83
1,5	2,84	2,84	2,84	1,5	3,75	3,76	3,75	1,5	1,93	1,93	1,93
2	1,91	1,84	1,88	2	1,28	1,14	1,21	2	2,55	2,55	2,55
6	3,48	1,66	2,57	5	6,39	3,87	5,13	4	0,57	1,46	1,01
10	2,00	1,88	1,94	8	3,06	5,56	4,31	6	0,64	0,52	0,58
14	2,25	1,00	1,63	11	1,58	3,25	2,42	8	0,85	0,56	0,70
18	1,98	1,56	1,77	14	3,50	2,50	3,00	11	0,52	0,62	0,57
22	2,91	1,48	2,20	17	1,20	3,25	2,23	14	0,61	0,60	0,61
26	1,99	1,52	1,76	21	1,74	2,45	2,09	17	0,96	0,59	0,77
30	2,91	1,39	2,15	25	0,88	2,12	1,50	20	0,94	0,66	0,80

Tabla 54: Valores de la cinética de Turbidez a pH: 13, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 20 min		
	NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio		NTU ₁	NTU ₂	Promedio
0	865	865	955,35	0	865	865	1000,86	0	865,00	865	900,86
1	7,47	7,44	7,45	1	16,65	15,93	16,29	1	6,78	6,75	6,76
1,5	71,10	71,65	71,38	1,5	17,90	17,60	17,75	1,5	9,93	9,74	9,83
2	1,54	65,00	33,27	2	14,10	12,90	13,50	2	16,60	16,35	16,48
6	2,00	2,85	2,42	5	28,85	29,74	29,30	4	8,17	9,02	8,59
10	1,14	0,89	1,02	8	25,20	26,45	25,83	6	19,65	22,00	20,83
14	0,77	1,13	0,95	11	23,30	23,75	23,53	8	10,17	11,42	10,80
18	1,83	2,58	2,21	14	23,00	23,86	23,43	11	22,30	22,54	22,42
22	1,25	1,60	1,43	17	24,55	25,61	25,08	14	19,25	20,60	19,93
26	1,35	2,04	1,69	21	16,00	14,75	15,38	17	24,30	23,74	24,02
30	0,89	1,85	1,37	25	15,20	14,84	15,02	20	22,75	24,27	23,51

Resultado: Tablas de Azucres Reductores

Tabla 55: Valores de la cinética de azucres reductores a pH: 9, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 50°C t : 20 min		
	A.R. ₁	A.R. ₂	Promedio		A.R. ₁	A.R. ₂	Promedio		A.R. ₁	A.R. ₂	Promedio
0	0,72	0,7	0,71	0	0,72	0,74	0,73	0	0,72	0,7	0,71
1	0,68	0,64	0,66	1	0,54	0,54	0,54	1	0,72	0,69	0,71
1,5	0,64	0,67	0,66	1,5	0,53	0,52	0,53	1,5	0,71	0,70	0,70
2	0,65	0,65	0,65	2	0,52	0,48	0,50	2	0,67	0,70	0,69
6	0,65	0,59	0,62	5	0,48	0,44	0,46	4	0,64	0,70	0,67
10	0,68	0,61	0,64	8	0,51	0,47	0,49	6	0,65	0,71	0,68
14	0,65	0,64	0,65	11	0,47	0,43	0,45	8	0,66	0,68	0,67
18	0,63	0,61	0,62	14	0,51	0,49	0,50	11	0,65	0,67	0,66
22	0,67	0,66	0,67	17	0,45	0,44	0,44	14	0,64	0,68	0,66
26	0,70	0,66	0,68	21	0,38	0,48	0,43	17	0,66	0,70	0,68
30	0,69	0,68	0,69	25	0,51	0,51	0,51	20	0,67	0,69	0,68

Tabla 56: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 9, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 70°C t : 20 min		
	A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio
0	0,71	0,69	0,70	0	0,74	0,7	0,72	0	0,69	0,67	0,68
1	0,47	0,59	0,53	1	0,47	0,77	0,62	1	0,49	0,60	0,55
1,5	0,47	0,56	0,52	1,5	0,48	0,75	0,62	1,5	0,48	0,59	0,54
2	0,46	0,55	0,51	2	0,47	0,73	0,60	2	0,48	0,57	0,53
6	0,50	0,50	0,50	5	0,47	0,75	0,61	4	0,51	0,52	0,51
10	0,50	0,55	0,52	8	0,47	0,76	0,62	6	0,50	0,52	0,51
14	0,50	0,53	0,52	11	0,50	0,76	0,63	8	0,51	0,55	0,53
18	0,48	0,57	0,52	14	0,49	0,74	0,62	11	0,53	0,54	0,53
22	0,46	0,60	0,53	17	0,50	0,74	0,62	14	0,52	0,53	0,53
26	0,51	0,59	0,55	21	0,52	0,74	0,63	17	0,51	0,56	0,54
30	0,52	0,62	0,57	25	0,52	0,72	0,62	20	0,51	0,55	0,53

Tabla 57: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 9, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 9 –T: 90°C t : 20 min		
	A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio
0	0,73	0,75	0,74	0	0,7	0,74	0,72	0	0,75	0,75	0,75
1	0,42	0,44	0,43	1	0,51	0,51	0,51	1	0,47	0,58	0,52
1,5	0,43	0,43	0,43	1,5	0,46	0,47	0,46	1,5	0,49	0,50	0,49
2	0,43	0,43	0,43	2	0,44	0,48	0,46	2	0,47	0,52	0,50
6	0,42	0,46	0,44	5	0,41	0,51	0,46	4	0,48	0,52	0,50
10	0,41	0,48	0,44	8	0,43	0,55	0,49	6	0,51	0,51	0,51
14	0,42	0,50	0,46	11	0,41	0,58	0,50	8	0,49	0,54	0,52
18	0,45	0,48	0,47	14	0,40	0,58	0,49	11	0,54	0,52	0,53
22	0,44	0,48	0,46	17	0,42	0,58	0,50	14	0,52	0,54	0,53
26	0,46	0,47	0,47	21	0,41	0,59	0,50	17	0,47	0,56	0,52
30	0,51	0,46	0,49	25	0,49	0,60	0,55	20	0,47	0,58	0,52

Tabla 58: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 1, temperatura: 50°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 50°C t : 20 min		
	A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio
0	0,69	0,75	0,72	0	0,7	0,74	0,72	0	0,65	0,73	0,69
1	0,42	0,42	0,42	1	0,43	0,48	0,46	1	0,60	0,58	0,59
1,5	0,43	0,43	0,43	1,5	0,37	0,51	0,44	1,5	0,57	0,60	0,59
2	0,43	0,43	0,43	2	0,41	0,49	0,45	2	0,59	0,61	0,60
6	0,38	0,42	0,40	5	0,40	0,39	0,39	4	0,64	0,59	0,62
10	0,36	0,39	0,38	8	0,39	0,36	0,37	6	0,63	0,60	0,62
14	0,38	0,41	0,40	11	0,37	0,38	0,37	8	0,65	0,60	0,63
18	0,34	0,42	0,38	14	0,36	0,41	0,39	11	0,62	0,57	0,60
22	0,34	0,41	0,38	17	0,41	0,35	0,38	14	0,65	0,61	0,63
26	0,35	0,40	0,38	21	0,31	0,42	0,36	17	0,62	0,59	0,61
30	0,32	0,39	0,36	25	0,38	0,37	0,37	20	0,70	0,66	0,68

Tabla 59: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 11, temperatura: 70°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 70°C t : 20 min		
	A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio
0	0,73	0,79	0,76	0	0,69	0,71	0,70	0	0,70	0,74	0,72
1	0,46	0,46	0,46	1	0,22	0,52	0,37	1	0,19	0,24	0,22
1,5	0,29	0,39	0,34	1,5	0,26	0,47	0,36	1,5	0,22	0,19	0,21
2	0,29	0,37	0,33	2	0,29	0,40	0,34	2	0,18	0,20	0,19
6	0,35	0,35	0,35	5	0,27	0,44	0,35	4	0,18	0,24	0,21
10	0,34	0,38	0,36	8	0,43	0,36	0,39	6	0,24	0,25	0,24
14	0,32	0,38	0,35	11	0,40	0,39	0,39	8	0,21	0,22	0,22
18	0,31	0,36	0,34	14	0,41	0,38	0,39	11	0,29	0,22	0,26
22	0,36	0,36	0,36	17	0,36	0,36	0,36	14	0,20	0,24	0,22
26	0,36	0,33	0,35	21	0,42	0,37	0,39	17	0,23	0,26	0,24
30	0,35	0,33	0,34	25	0,34	0,37	0,35	20	0,23	0,26	0,24

Tabla 60: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 11, temperatura: 90°C y tiempo: 20,25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 11 –T: 90°C t : 20 min		
	A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio
0	0,68	0,72	0,70	0	0,68	0,74	0,71	0	0,73	0,63	0,68
1	0,09	0,09	0,09	1	0,11	0,11	0,11	1	0,15	0,16	0,16
1,5	0,06	0,06	0,06	1,5	0,05	0,05	0,05	1,5	0,12	0,16	0,14
2	0,07	0,07	0,07	2	0,06	0,06	0,06	2	0,17	0,10	0,14
6	0,07	0,07	0,07	5	0,08	0,08	0,08	4	0,16	0,19	0,18
10	0,08	0,08	0,08	8	0,06	0,06	0,06	6	0,15	0,17	0,16
14	0,08	0,07	0,08	11	0,07	0,08	0,07	8	0,19	0,18	0,19
18	0,07	0,07	0,07	14	0,09	0,09	0,09	11	0,14	0,17	0,15
22	0,08	0,09	0,08	17	0,09	0,09	0,09	14	0,16	0,16	0,16
26	0,08	0,08	0,08	21	0,06	0,06	0,06	17	0,21	0,14	0,17
30	0,07	0,07	0,07	25	0,07	0,08	0,07	20	0,13	0,16	0,14

Tabla 61: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 13, temperatura: 50°C y tiempo: 20, 25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 50°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 31 –T: 50°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 50°C t : 20 min		
	A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio
0	0,68	0,72	0,70	0	0,72	0,82	0,77	0	0,71	0,77	0,74
1	0,14	0,1381	0,14	1	0,12	0,18	0,15	1	0,05	0,17	0,11
1,5	0,15	0,1470	0,15	1,5	0,11	0,19	0,15	1,5	0,04	0,17	0,10
2	0,16	0,1559	0,16	2	0,22	0,09	0,15	2	0,15	0,09	0,12
6	0,18	0,1790	0,18	5	0,21	0,08	0,14	4	0,14	0,08	0,11
10	0,12	0,1250	0,12	8	0,24	0,11	0,18	6	0,17	0,12	0,14
14	0,24	0,1900	0,21	11	0,24	0,11	0,18	8	0,17	0,11	0,14
18	0,24	0,1710	0,21	14	0,23	0,10	0,17	11	0,16	0,13	0,15
22	0,11	0,1090	0,11	17	0,28	0,15	0,22	14	0,21	0,15	0,18
26	0,13	0,1400	0,13	21	0,22	0,09	0,15	17	0,15	0,12	0,13
30	0,13	0,1450	0,14	25	0,21	0,08	0,14	20	0,14	0,11	0,12

Tabla 62: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 13, temperatura: 70°C y tiempo: 20, 25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 70°C t : 20 min		
	A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio
0	0,75	0,71	0,73	0	0,71	0,69	0,70	0	0,62	0,68	0,65
1	0,10	0,09	0,10	1	0,09	0,07	0,08	1	0,09	0,07	0,08
1,5	0,07	0,08	0,08	1,5	0,05	0,06	0,06	1,5	0,05	0,09	0,07
2	0,09	0,07	0,08	2	0,08	0,08	0,08	2	0,09	0,08	0,09
6	0,05	0,10	0,08	5	0,05	0,08	0,07	4	0,06	0,07	0,07
10	0,07	0,08	0,07	8	0,07	0,05	0,06	6	0,07	0,06	0,07
14	0,06	0,09	0,08	11	0,07	0,05	0,06	8	0,06	0,06	0,06
18	0,06	0,08	0,07	14	0,07	0,07	0,07	11	0,08	0,08	0,08
22	0,06	0,07	0,07	17	0,06	0,05	0,06	14	0,08	0,06	0,07
26	0,06	0,08	0,07	21	0,05	0,09	0,07	17	0,07	0,07	0,07
30	0,05	0,05	0,05	25	0,05	0,07	0,06	20	0,06	0,08	0,07

Tabla 63: Valores de la cinética de azúcares reductores a pH: 13, temperatura: 90°C y tiempo: 20, 25 y 30 minutos.

Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 30 min			Tiempo (min)	pH 13 –T: 90°C t : 25 min			Tiempo (min)	pH 13 –: 90°C t : 20 min		
	A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio		A.R.1	A.R.2	Promedio
0	0,69	0,7	0,70	0	0,7	0,74	0,72	0	0,70	0,78	0,74
1	0,09	0,09	0,09	1	0,09	0,09	0,09	1	0,09	0,08	0,09
1,5	0,06	0,07	0,07	1,5	0,08	0,08	0,08	1,5	0,07	0,08	0,08
2	0,07	0,06	0,07	2	0,07	0,07	0,07	2	0,07	0,06	0,07
6	0,07	0,05	0,06	5	0,04	0,10	0,07	4	0,05	0,07	0,06
10	0,06	0,06	0,06	8	0,07	0,09	0,08	6	0,06	0,09	0,07
14	0,09	0,08	0,09	11	0,07	0,09	0,08	8	0,08	0,08	0,08
18	0,07	0,09	0,08	14	0,06	0,08	0,07	11	0,06	0,09	0,08
22	0,06	0,08	0,07	17	0,05	0,06	0,05	14	0,06	0,10	0,08
26	0,06	0,09	0,07	21	0,05	0,07	0,06	17	0,05	0,09	0,07
30	0,07	0,08	0,07	25	0,03	0,04	0,03	20	0,07	0,09	0,08

Anexo 3

Modelamiento matemático de las cinéticas de los °Brix, sacarosa, turbidez y azúcares reductores.

Modelamiento para los °Brix

Ecuación	$^{\circ}\text{Brix} = 7.996 * \exp(0.029 * \text{tiempo}^{0.192}) + 0.01 * \text{tiempo}$
R²	0.78

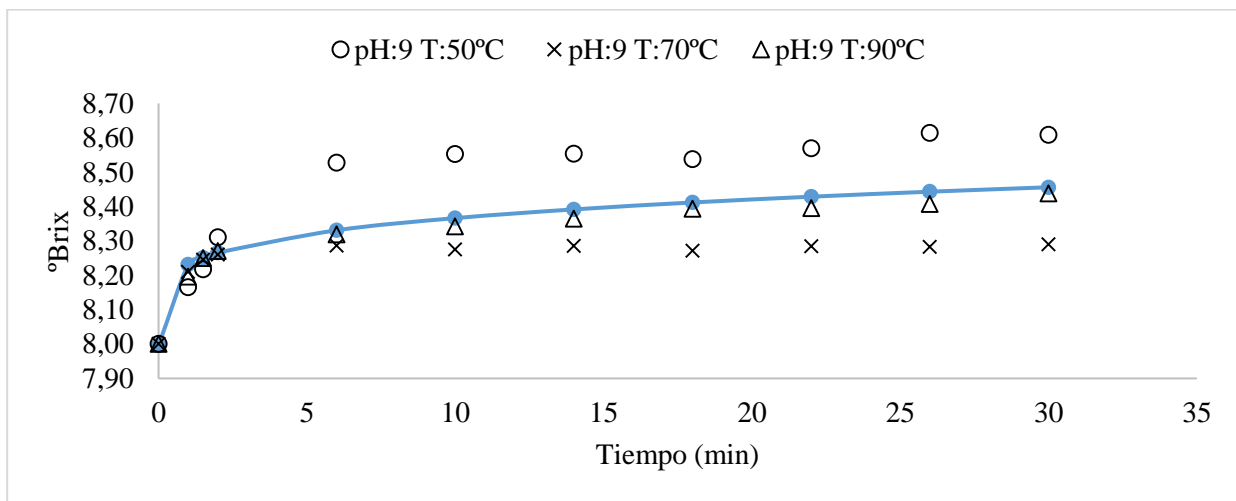


Gráfico 43: Modelamiento para los °Brix a pH: 9 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C (Modelo 1)

Ecuación	$^{\circ}\text{Brix} = 8 * \exp(-0.2 * \text{tiempo}^{-0.19}) + 0.019 * \text{tiempo}$
R²	0.82

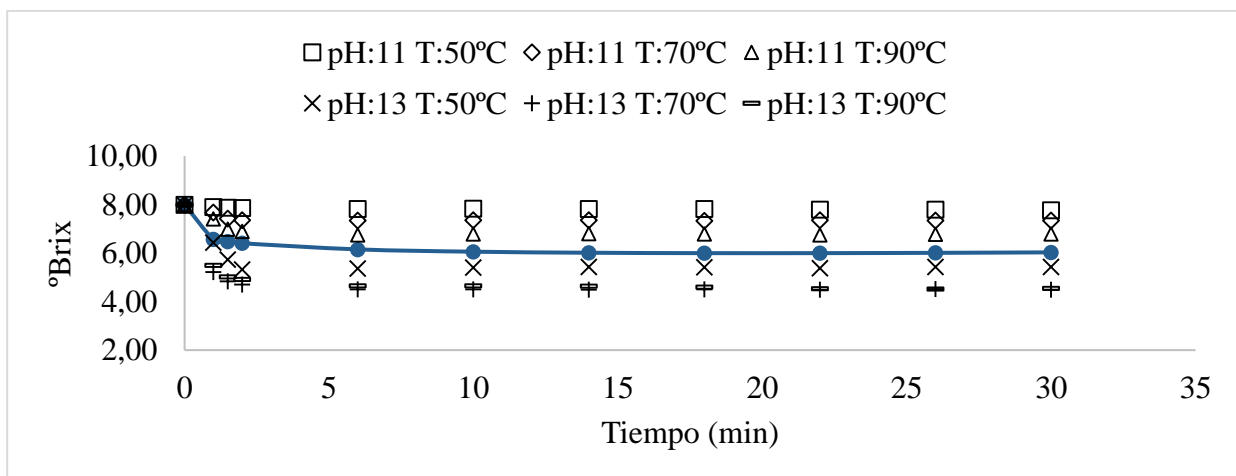


Gráfico 44: Modelamiento para los °Brix a pH: 11 y 13 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C (Modelo 2)

Modelamiento para Sacarosa

Ecuación	Sacarosa = 32.47*exp(0.19*tiempo^{0.007})+0.001*tiempo
R²	0.89

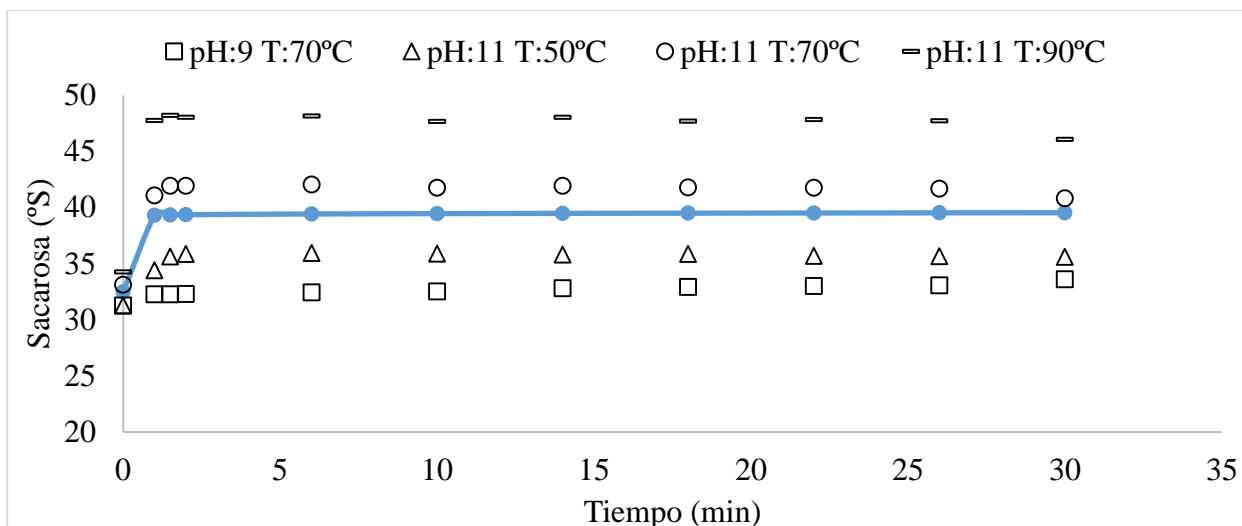


Gráfico 45: Modelamiento para sacarosa (°S) a pH: 11 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C, pH: 9 y temperatura: 70°C (Modelo 1)

Ecuación	Sacarosa = 31*exp(-0.2*tiempo^{-0.09})+0.01*tiempo
R²	0.87

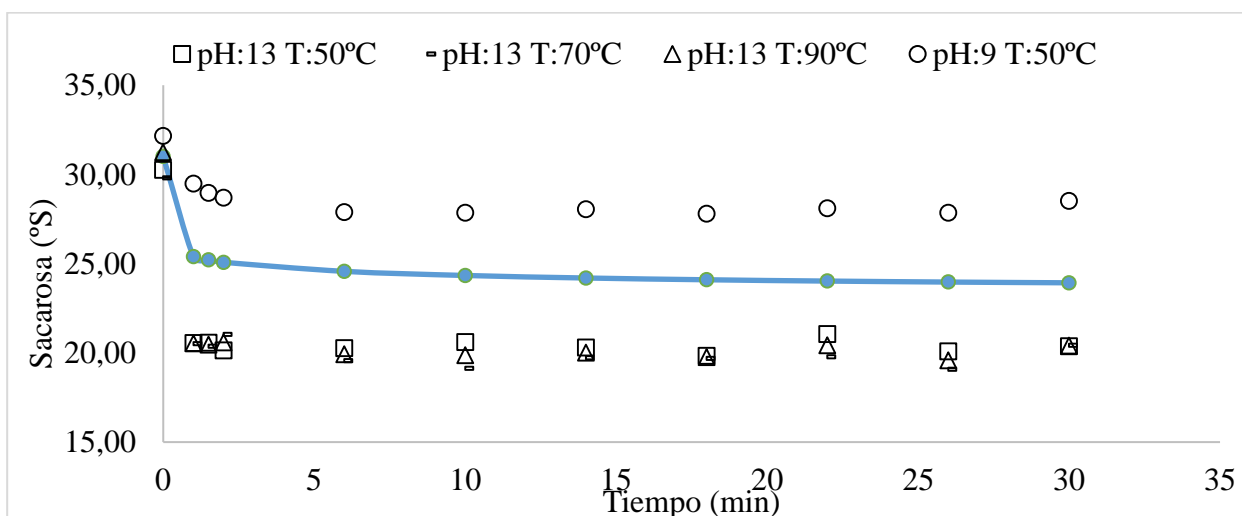


Gráfico 46: Modelamiento para sacarosa (°S) a pH: 13 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C, pH: 9 y temperatura: 50°C (Modelo 2)

Modelamiento para Turbidez

Ecuación	$Turbidez = 0.7 * \exp(-0.5 * tiempo^{0.006}) + 0.001 * tiempo$
R²	0.85

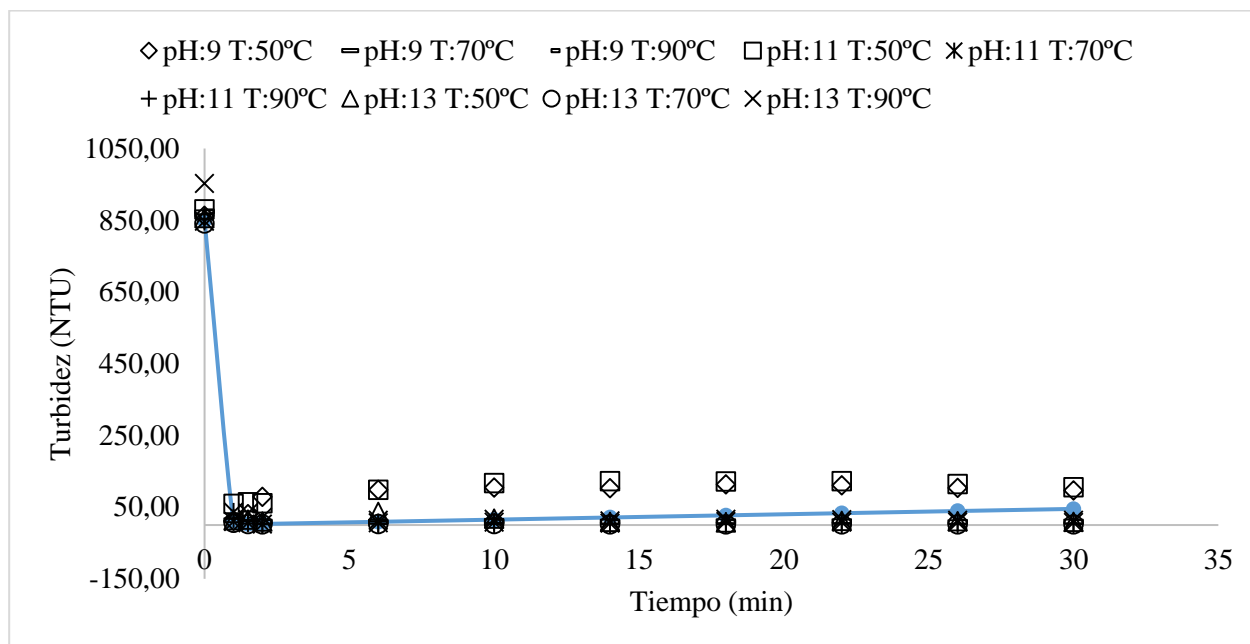


Gráfico 47: Modelamiento para Turbidez (NTU) a pH: 9, 11 y 13 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C.

Modelamiento para Azucares Reductores

Ecuación	A.R. = $850 * \exp(5 * \text{tiempo}^{50}) + 1.5 * \text{tiempo}$
R²	0.79

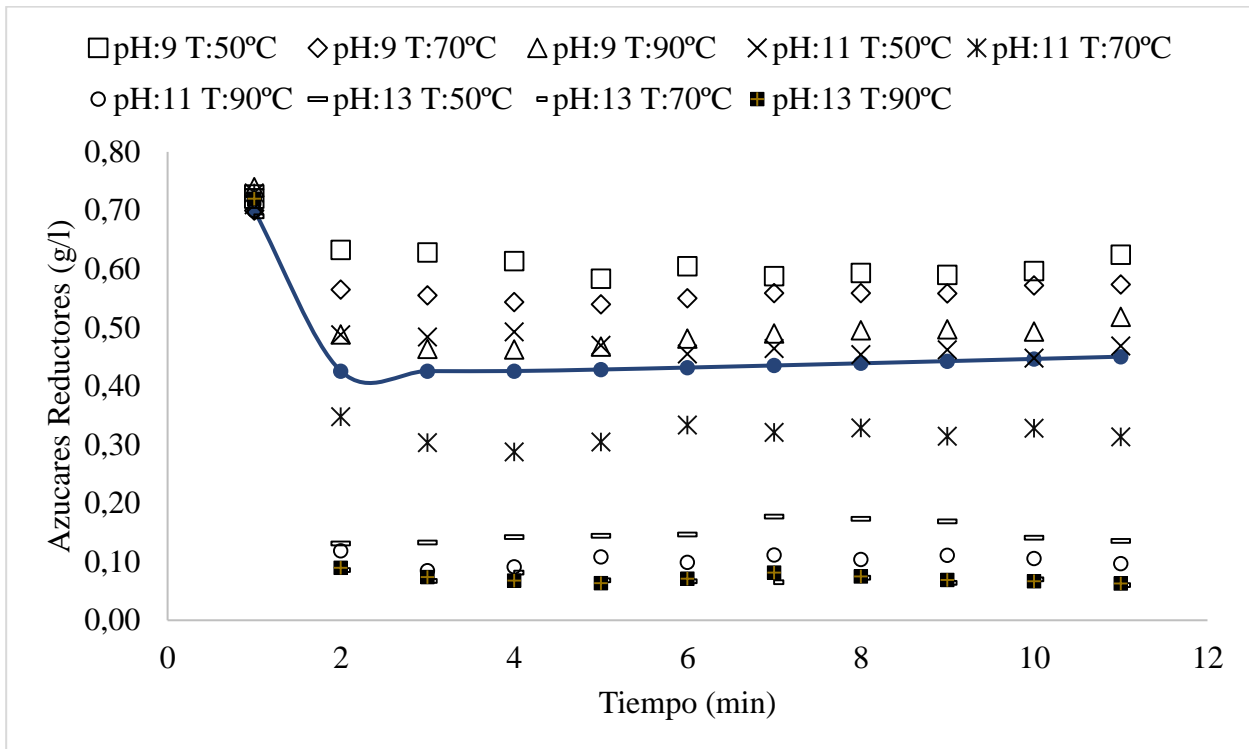


Grafico 48: Modelamiento para Azucares Reductores (g/l) a pH: 9, 11 y 13 y temperaturas de 50, 70 y 90 °C.