

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): JISELLE MAYERLY APELLIDOS: CONTRERAS BLANCO

FACULTAD: FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA BIOTECNOLÓGICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): GERMAN RICARDO APELLIDOS: GELVES ZAMBRANO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BANANO DE RECHAZO UTILIZANDO LEVADURA FLOCULANTE.

Se presenta un modelo dinámico para simular un proceso de fermentación para producir bioetanol a partir de banano de rechazo utilizando un sistema discontinuo. La característica crítica del modelo es usar una función de inhibición para relacionar la concentración de sustrato y la tasa de crecimiento específica. Los parámetros cinéticos se calcularon en base a datos experimentales previos y se investiga la concentración óptima de sustrato y carga inicial de inóculo. El modelo cinético de Andrews se adaptó a los perfiles de concentración, indicando que podría describir la existencia de inhibición de sustrato. Se evaluaron diferentes concentraciones iniciales de sustrato e inóculo (90, 300, 510), y (0.43, 1.43, 3.43) g/L respectivamente. Como resultado, se obtuvo que las mejores condiciones iniciales son cuando la concentración de sustrato y células son iguales a 300 y 3.43 g/L, respectivamente; estas condiciones permitieron obtener una concentración final de bioetanol de 230 g/L después de 30 horas de proceso. Sin embargo, al usar una concentración alta de sustrato, se produce una inhibición de la concentración, por lo que la producción de bioetanol desciende. Los modelos cinéticos proporcionan información importante sobre los procesos metabólicos microbianos y facilitan una buena aproximación para etapas posteriores a gran escala.

PALABRAS CLAVES: Biocombustibles, Matlab, bioproceso, modelo cinético, simulación dinámica.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 57 PLANOS: _____ ILUSTRACIONES: 11 CD ROOM: _____

**SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE
BANANO DE RECHAZO UTILIZANDO LEVADURA FLOCULANTE**

JISELLE MAYERLY CONTRERAS BLANCO

1611423

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA BIOTECNOLÓGICA
SAN JOSE DE CUCUTA, NORTE DE SANTANDER**

2023

**SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE
BANANO DE RECHAZO UTILIZANDO LEVADURA FLOCULANTE**

JISELLE MAYERLY CONTRERAS BLANCO

1611423

Trabajo de grado

**Presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Biotecnológico**

Director:

Germán Ricardo Gelves Zambrano, Ing, PhD

Docente TC UFPS

Co-Directora:

Lilibeth Niño López, Ing, PhD

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE.
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA BIOTECNOLÓGICA
SAN JOSE DE CUCUTA, NORTE DE SANTANDER**

2023



ACTA DE SUSTENTACION DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: 07 marzo de 2023

HORA: 04:00 P.M.

LUGAR: UFPS - CUCUTA, NORTE DE SANTANDER – SD 304

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA BIOTECNOLÓGICA

TITULO: “SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BANANO DE RECHAZO UTILIZANDO LEVADURA FLOCULANTE.”

MODALIDAD: INVESTIGACIÓN

JURADO PAOLA ANDREA ROMAN HERNANDEZ
HEBERTH MILTON MOJICA SÁNCHEZ
ROMINA ESMERALDA FUENTES DÍAZ

ENTIDAD: UFPS

DIRECTOR: German Ricardo Gelves Zambrano, Ing, PhD
Co-Director (a): Lilibeth Niño Lopez, Ing, PhD

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTE	CODIGO	CALIFICACION
Jiselle Mayerly Contreras Blanco	1611423	4.5

OBSERVACIONES: MERITORIA.

FIRMA DE LOS JURADOS

Paola Andrea Román Hernández

Heberth Milton Mojica Sánchez

Romina E. Fuentes Díaz

Paola Andrea Román Hernández Heberth Milton Mojica Sanchez Romina Esmeralda Fuentes Diaz

Vo. Bo Coordinador Comité Curricular

German Ricardo Gelves Zambrano

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por permitirme culminar este proceso académico, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera profesional, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, y experiencias.

A mis padres y abuelos Nelly Gómez y Joaquín Blanco, quienes, con sus valores y principios forjaron un ser íntegro, los honro. A mi madre; Maribel Blanco, porque sin ella nada de esto hubiera sido posible, gracias por ser mi motivación. A Keimer Johan, por su apoyo incondicional. A Jeffersson por ser mi hermano. Al profesor Ricardo Gelves por guiarme durante este proceso, por compartir sus conocimientos, por su tiempo y asesoría a lo largo del desarrollo y culminación de la investigación. En conjunto a ellos porque creyeron en mí en todo momento y no dudaron de mis habilidades.

A mi amuleto de la buena suerte, mi compañera fiel durante todas las noches de desvelo, que nada más bastaba con verla dormida en mi cama para no sentirme sola y trabajar a gusto, gracias Rouse.

A mi compañero Yeison por haberme ayudado en el inicio de ésta investigación y a cada una de esas personas que contribuyeron con su granito de arena durante este proceso.

A la Universidad Francisco de Paula Santander y a su calidad de docentes, por brindarme las herramientas necesarias para poder tener los conocimientos para lograr mi título como Ingeniera Biotecnológica.

En especial, a mí, por no rendirme.

Tabla de Contenido

Resumen	10
Introducción	11
1. El Problema.....	13
1.1 Título	13
1.2 Planteamiento del Problema.....	13
1.3 Formulación del Problema	14
1.4 Justificación.....	14
1.5 Objetivos	16
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	16
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	16
1.6 Alcances y Limitaciones	16
1.6.1. <i>Alcances</i>	16
1.7 Delimitaciones	17
1.7.1. <i>Delimitación Espacial</i>	17
1.7.2. <i>Delimitación Temporal</i>	17
2. Marco Referencial	17
2.1 Antecedentes.....	17
2.2 Marco Teórico	18
2.3 Marco Conceptual.....	20
2.4 Marco Contextual	21

2.5	Marco Legal.....	21
3.	Diseño Metodológico	24
3.1	Tipo de Investigación	24
3.2	Población y Muestra	24
3.3	Hipótesis	24
3.3.	Fases de la Investigación.....	24
4.	Desarrollo del Modelado de Producción de Bioetanol.....	26
4.1	Expresiones Matemáticas y Constantes Cinéticas	26
5.	Resultados y Análisis	28
5.1	Resultado Modelo Matemático	28
5.2	Determinación de las Mejores Condiciones de Operación	33
	Conclusiones	47
	Recomendaciones.....	49
	Bibliografía.....	50

Lista de Tablas

Tabla 1. Condiciones y parámetros iniciales utilizados para las simulaciones	29
Tabla 2. Parámetros cinéticos simulados	29
Tabla 3. Parámetros cinéticos parametrizados	31
Tabla 4. Diseño factorial completo 3^2	34
Tabla 5. Resultados promedio de Bioetanol obtenido por cada simulación	44

Lista de Figuras

Figura 1. Modelado sin parametrizar de la producción de bioetanol basado en datos experimentales. Asteriscos (Datos experimentales); Línea sólida (Datos simulados). (a) Sustrato, (b) Biomasa, (c) Producto	30
Figura 2. Modelado parametrizado de la producción de bioetanol basado en datos experimentales. Asteriscos (Datos experimentales); Línea sólida (Datos simulados). (a) Sustrato, (b) Biomasa, (c) Producto.	32
Figura 3. Efecto del sustrato en la producción de Bioetanol con una concentración de 0.43 (g/L) de inóculo de levadura floculante. A diferentes concentraciones de Banano de rechazo, (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente	35
Figura 4. Consumo de sustrato simulado a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 0.43 g/L de levadura floculante.	36
Figura 5. Biomasa total X_t producida ($X_v + X_d$), simulada a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300, (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 0.43 g/L de levadura floculante	37
Figura 6. Efecto del sustrato en la producción de Bioetanol con una concentración de 1.43 (g/L) de inóculo de Levadura Floculante. A diferentes concentraciones de Banano de rechazo, (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente.....	38
Figura 7. Consumo de sustrato simulado a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de Inóculo de 1.43 g/L de Levadura floculante.	39
Figura 8. Biomasa total X_t producida ($X_v + X_d$), simulada a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 1.43 g/L de levadura floculante.	40
Figura 9. Efecto del sustrato en la producción de Bioetanol con una concentración de 3.43 (g/L) de inóculo de Levadura floculante. A diferentes concentraciones de Banano de rechazo, (a) 90, (b) 300 y (c) 500 g/L, respectivamente.....	41
Figura 10. Consumo de sustrato simulado a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300, (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 3.43 g/L de Levadura floculante	42
Figura 11. Biomasa total X_t producida ($X_v + X_d$), simulada a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 3.43 g/L de Levadura floculante.....	43

Resumen

El rápido desarrollo de la industria automotriz y la contaminación ambiental han aumentado el interés comercial en la producción y consumo de energías renovables, respetuosas con el medio ambiente, como el bioetanol obtenido a partir de la fermentación de carbohidratos. Los residuos de plátanos maduros, que representan un tercio del volumen de producción en Colombia, pueden ser utilizados en procesos de fermentación alcohólica para obtener bioetanol, lo que convierte pérdidas en beneficios. El objetivo de esta investigación fue proponer mediante simulación mejoras para el proceso de producción de bioetanol con banano de rechazo a partir de células floculadas de *Saccharomyces cerevisiae* mediante el software Matlab. Lo primero que se realizó fue la determinación de un modelo matemático que describiera de manera óptima la obtención de bioetanol, seguido de esto, se parametrizaron las constantes cinéticas para calibrar el modelo matemático y así mejorar su precisión hacia la descripción del proceso. Por último, se diseñó un experimento por niveles para determinar las mejores condiciones iniciales de sustrato e inóculo para mejorar la productividad y así obtener mayor concentración de bioetanol. A nivel de resultados, se obtuvo que las mejores condiciones iniciales son cuando la concentración de sustrato y células son iguales a 300 g/L y 3.43 g/L respectivamente; estas condiciones permitieron obtener un valor de producción de bioetanol por encima de 200 g/L después de 30 horas de proceso. En conclusión, se propuso un modelo matemático basado en el modelo cinético descrito por Andrews para producir bioetanol a partir de levadura floculante en un sustrato de banano de rechazo.

Palabras Claves: Sistema discontinuo, biocombustibles, Matlab, bioproceso, modelo cinético, simulación dinámica.

Introducción

La creciente demanda en el consumo de combustibles fósiles a base de petróleo en consecuencia al rápido desarrollo de la industria automotriz a la par con los problemas de contaminación ambiental (Thangavelu, 2016), y la incertidumbre sobre el calentamiento global durante la última década sin duda ha aumentado el interés comercial, en la producción y consumo de energías renovables, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Romero, 2019). Además, debido a la magnitud de la contaminación que ha alcanzado el medio ambiente, los sectores público y privado han adoptado políticas adaptadas a los impactos negativos de las actividades productivas. Por este motivo, se han buscado alternativas al uso de combustibles fósiles. Una de estas alternativas es la obtención de etanol a partir de la fermentación de carbohidratos. Actualmente, la producción de bioetanol se sintetiza durante la fermentación anaeróbica de glucosa a través de la biomasa lignocelulósica, la cual puede obtenerse a partir de materiales de desecho de las actividades agrícolas (Conesa, 2013), también presente en la biomasa de diversas sustancias orgánicas como la caña de azúcar y la remolacha, en cereales como el maíz, el trigo y el sorgo, el almidón también se puede convertir en azúcar. Estos sustratos vegetales están compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales son considerados la materia prima del futuro para la producción de biocombustibles, por su bajo costo y disponibilidad (Abril & Navarro, 2012) asimismo la producción y el uso de dichos combustibles ayudan a minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que son obtenidos de fuentes de energía alternativa (Silva, 2014).

Debido a que los centros mayoristas o de suministro tienden a tener una alta tasa de madurez en sus productos, la competencia en el mercado ha ayudado a incrementar la productividad empresarial y agregar valor tanto a los productos como a los procesos de producción en beneficio del consumidor final.

La industria visualiza cada vez nuevas formas de utilizar estos recursos y, por tanto, no desperdiciar los residuos obtenidos, que pueden tener un valor agregado como materia prima para otros procesos. Ahora bien, los plátanos maduran más rápido que otras frutas. Por tanto, este producto debe consumirse o venderse pronto, ya que resulta menos agradable al público para su venta cuando maduran. Por ello, se buscan alternativas para aprovechar este residuo, convirtiendo pérdidas en beneficios. La fruta del banano maduro tiene un alto contenido en carbohidratos (22-28%), y su volumen de producción en Colombia alcanza las 4.805.629 toneladas / año. Además de esto, Colombia ocupa el 4 lugar en producción, rendimiento y área sembrada de plátano a nivel mundial (Minagricultura, 2020). Actualmente, un tercio de la fruta que no se exporta se destina al consumo interno. Otro tercio se utiliza como materia prima en la producción de fertilizantes orgánicos para el cultivo de la misma fruta, y un tercio todavía se considera desperdicio. Es precisamente estos dos últimos tercios del residuo que potencialmente pueden ser utilizados en procesos de fermentación alcohólica. Por estas razones, el banano de rechazo es identificado como un sustrato adecuado para la obtención de bioetanol.

Se ha demostrado en estudios previos que es posible obtener fermentos con alto contenido de alcohol a partir de bananos rechazados utilizando levaduras comerciales. Entonces, las levaduras aisladas con las características deseadas, como la propiedad de floculación, mejoran el proceso de fermentación. Por tanto, el desarrollo de un bioproceso utilizando células floculadas de *Saccharomyces cerevisiae* y bananos de rechazo para la producción de etanol se consideran un bioproceso rentable y una alternativa a los problemas actuales.

Con base en esto último, el objetivo de este estudio fue simular el desempeño del proceso de fermentación del banano de rechazo y mejorar este bioproceso para la obtención de bioetanol mediante un sistema batch. Es considerado este sistema ya que garantiza la

integridad y trazabilidad de los datos en los procesos productivos. Además, se tomaron datos experimentales de estudios previos (Teles, 2017 & Bello, 2020). Asimismo, se utilizó el software Matlab, el cual permite modelar y analizar sistemas estáticos y dinámicos.

1. El Problema

1.1 Título

Simulación dinámica de la producción de bioetanol a partir de banano de rechazo utilizando levadura floculante.

1.2 Planteamiento del Problema

La dependencia prácticamente total de un modelo energético basado en el carbón, el gas y el petróleo, está ocasionando que el planeta sufra cambios en el clima de efectos desastrosos para la vida del mismo; esta contaminación es causada principalmente por las emisiones de vehículos y fábricas, por consiguiente ha dejado de ser un problema local o regional, para convertirse en un problema de nivel global, de modo que al continuar con la emisión de gases contaminantes, como el dióxido de carbono, por medio vehicular, la quema de combustibles fósiles o la tala y quema de bosques; es alarmante, debido que la acumulación de este gas, junto con otros, atrapa la radiación solar cerca de la superficie terrestre, causando un calentamiento global denominado efecto invernadero.

En el 2019, y por tercer año consecutivo, las emisiones mundiales de GEI volvieron a aumentar y se situaron en un máximo histórico: 52,4 GtCO₂e (rango de $\pm 5,2$) (ONU, 2020). Según el informe sobre la brecha en las emisiones del 2020, “*Las emisiones mundiales de*

gases de efecto invernadero han incrementado un 1,4% anual como promedio desde el 2010. En el 2019, el aumento fue más pronunciado con un 2,6% en emisiones GEP; en vista de que hubo un incremento en las emisiones de gases, los sectores público y privado han adoptado políticas adaptadas a los impactos negativos de las actividades productivas. En el Informe sobre la Brecha de Emisiones 2022, se evidencia que el mundo necesita reducir sus emisiones de GEI en un 45% (UNEP, 2022) en consecuencia, de esto al no modificarse el abastecimiento energético por combustibles fósiles, seguirá aumentando el porcentaje de emisión de gases. Por lo tanto, se hace necesario proponer una alternativa que ayude a mitigar esta problemática a través de combustibles renovables amigables con el medio ambiente.

1.3 Formulación del Problema

¿Es posible identificar los efectos de la concentración inicial de sustrato en la producción de etanol a partir de un modelo matemático que permita ofrecer diferentes comportamientos dinámicos?

1.4 Justificación

La necesidad de reducir las emisiones GEI, lleva a proponer alternativas que ayuden a mitigar la problemática a través de combustibles renovables, esto precisa un cambio significativo de dirección. Por consiguiente, la Ingeniería biotecnológica ofrece herramientas que facilitan la obtención de biocombustibles, como lo es el proceso de fermentación alcohólica, el cual es un proceso anaeróbico realizado por levaduras y algunas bacterias, donde estos microorganismos transforman el azúcar en alcohol etílico, dióxido de carbono, y energía. La presente investigación se enfocará en realizar la simulación de la producción de

bioetanol, obtenido del proceso de fermentación alcohólica utilizando células flocculadas de *Saccharomyces cerevisiae* y bananos de rechazo.

Saccharomyces cerevisiae es una levadura heterótrofa, que obtiene la energía a partir de la glucosa y tiene una elevada capacidad fermentativa (Suarez, 2016). Los residuos de banano de rechazo utilizados como sustrato tienen el potencial de producir etanol, con un método de producción sostenible y de bajo costo. Una propuesta de innovación es producir bioetanol de residuos que se descartan indiscriminadamente y que al mismo tiempo generan impactos desfavorables en todo tipo de ambiente. Además, estos subproductos en su generalidad corresponden al material lignocelulósico que contiene polímeros de celulosa y hemicelulosa entre 75 y 80%, que pueden ser degradados, por procesos químicos (Gerena, 2013), físicos y/o biológicos (Tejeda, 2010) en azúcares. Al año los recolectores de residuos sólidos urbanos transportan miles de toneladas que se acumulan en vertederos informales y la fracción orgánica se clasifica según su composición como material lignocelulósico; estos residuos reciben un pre tratamiento a base de hidrólisis química con hidróxido de sodio o ácido clorhídrico; y una hidrólisis biológica utilizando enzimas (Carmona, 2009); a través de esta se determina la cantidad de azúcares reductores, los cuales son utilizados posteriormente en el bioproceso de fermentación; seguido de esto se realiza una destilación simple, donde se determina la cantidad de bioetanol.

Es por esta razón que surge la necesidad de determinar un proceso, que con ayuda de la ingeniería a través de modelos matemáticos se logre llevar a cabo la simulación por medio del software Matlab, en el cual se mejore este bioproceso. Lo anterior, con el objetivo de promover la implementación de fuentes alternativas a partir de materias primas no convencionales y más asequibles para la obtención de energía, disminuyendo así el uso de combustibles fósiles gestionando mejor los recursos energéticos y apostando por las energías renovables.

1.5 Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Proponer mediante simulación mejoras para el proceso de producción de bioetanol con banano de rechazo a partir de células floculadas de *Saccharomyces cerevisiae* mediante el software Matlab.

1.5.2. Objetivos Específicos

Determinar un modelo matemático que permita simular satisfactoriamente el proceso.

Realizar un proceso de parametrización en Matlab entre un algoritmo de cómputo avanzado que permita obtener las mejores constantes del proceso.

Determinar mediante simulación los mejores niveles de sustrato y carga inicial de biomasa que permitan mejorar la producción de bioetanol.

1.6 Alcances y Limitaciones

1.6.1. Alcances

Mediante esta investigación se generó conocimiento relacionado con las mejoras realizadas para el proceso de producción de bioetanol necesarias para promover la implementación de alternativas rentables para mitigar el uso de combustibles fósiles. La información fue obtenida a través de predicciones mediante simulación con el software Matlab.

1.7 Delimitaciones

1.7.1. Delimitación Espacial

Este proyecto se ejecutó en el laboratorio de simulación de bioprocesos, localizado en el edificio de calidad ambiental, de la Universidad Francisco De Paula Santander, Sede Campos Elíseos.

1.7.2. Delimitación Temporal

El presente trabajo de investigación se realizó en un tiempo de 6 meses a partir de su aprobación.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

Existen diversas investigaciones y tecnologías acerca del proceso de producción de bioetanol con materias primas no convencionales de la agroindustria y agricultura convencional; estas se encuentran disponibles en los mercados de abasto en gran variedad que son utilizadas en las fermentaciones industriales; como son la cáscara, la pulpa de banano y naranja que fueron evaluadas por Hernández en 2017 con un tratamiento hidrotérmico obtuvo azúcares fermentables, consiguiendo una concentración final de 1,7 % (v/v) de bioetanol desde la pulpa de plátano tratada. Por otra parte Malagón en 2017 evaluó la producción de bioetanol a partir de diversas mezclas de residuos orgánicos vegetales que se recopilan en una empresa procesadora de alimentos, estableció que la combinación de residuos lulo-limón tuvo la concentración más alta de azúcares reductores logrando obtener 9.22 g bioetanol/kg de residuos como máximo rendimiento, así como también el uso de zumo de manzana de anacardo en la producción de etanol (Teles, 2017) son proyectos beneficiosos para el medio

ambiente, además son una fuente rentable de azúcar y están disponibles en grandes cantidades.

Actualmente se encuentran diversas referencias que avalan el uso de materia prima no convencional para el proceso de producción de bioetanol y, por lo tanto, resulta fácil encontrar una materia prima asequible y prometedora para motivar a la industria a ser implementada. Con este orden de ideas, las investigaciones presentes y futuras relacionadas a la responsabilidad social permitirán producir biocombustibles con fines comerciales para satisfacer una demanda insatisfecha, generar fuentes de trabajo, reducir los impactos negativos al ambiente, y disminuir el uso de los combustibles no renovables obtenidos del petróleo (Güiza-Suárez, 2019).

No obstante, desde una perspectiva industrial teniendo en cuenta condiciones de operación, tiempos de producción, y calidad, las células floculantes de *Saccharomyces cerevisiae*, se considera el microorganismo más empleado para este bioproceso, ya que estas levaduras han sido utilizadas para facilitar la recuperación de la biomasa de los productos de fermentación, a bajo costo (Verstrepen, 2006) y sin disminuir la viabilidad y vitalidad, así mismo se alcanzan ventajas operativas que reducen los gastos energéticos y la compra de equipos. Conforme a lo anterior se simuló el proceso de producción de bioetanol con el fin de proponer mejoras y una alternativa potencial a través del software Matlab.

2.2 Marco Teórico

Simulación de la Producción de Bioetanol con Banano de Rechazo Utilizando Levadura Floculante

En la simulación del proceso de producción de bioetanol mediante un sistema batch de comportamiento discontinuo el cual se alimenta, se cierra y se deja reaccionar, ofrece gran

valor interno para la mejora del bioproceso, el registro histórico de batch (lotes) permite dividir las producciones en secciones pequeñas, mejorando la eficiencia, el monitoreo, la flexibilidad y consistencia del proceso de fabricación. Ahora bien, se hace necesario determinar un modelo matemático el cual permite obtener observaciones fundamentales sobre los procesos metabólicos microbianos y proporcionar una aproximación para los casos en los que la composición celular es dependiente del tiempo o la concentración de sustrato es alta en comparación con la constante de saturación (Teles, 2017).

El crecimiento de un microorganismo puede interpretarse empleando diferentes modelos matemáticos; según estudios anteriores en el cual proponen el modelo cinético de Andrews para realizar la simulación de un bioproceso tiene la capacidad de describir la dinámica de la producción de bioetanol por una levadura floculante (Teles, 2017). El cual arrojó ser el modelo más acertado para representar la tasa de crecimiento específica sin inhibición, con inhibición por sustrato, con inhibición por producto, como se expone en el estudio de producción de etanol a partir de zumo de manzana de anacardo (Teles, 2017). En general se acepta el modelo matemático siempre y cuando se cumpla la cinética de Monod.

La simulación de este bioproceso se realizó a través de un software especializado como lo es Matlab el cual está optimizado para resolver problemas científicos y de ingeniería; se basa en matrices que expresa las matemáticas computacionales, sus gráficas integradas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos.

Realizar la simulación de este bioproceso ayuda a predecir el comportamiento del mismo, basado en la inhibición de sustrato, inhibición de biomasa, e inhibición de producto, acercándose a la realidad del estudio experimental (Teles, 2017), de modo que con el software Matlab es posible analizar, simular y mejorar el bioproceso.

2.3 Marco Conceptual

Lignocelulósico: El material lignocelulósico consiste en tres tipos diferentes de polímeros, celulosa, hemicelulosa y lignina.

Hemicelulosa: Es una estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa (pentosas), manosa, glucosa y galactosa (hexosas) y ácidos de azúcar. El componente dominante de la hemicelulosa de la madera y plantas agrícolas es el xilano.

Combustibles fósiles: Son los depósitos geológicos de materiales orgánicos combustibles que se encuentran enterrados y que se formaron por la descomposición de plantas y animales que fueron posteriormente convertidos en petróleo crudo, carbón, gas natural o aceites pesados al estar sometidos al calor y presión de la corteza terrestre durante cientos de millones de años.

Biocombustibles: Se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa de organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos. Estos pueden sustituir parte del consumo en combustibles fósiles tradicionales, algunos los consideran fuente de energía renovable y que tienen poco impacto ambiental.

Bioetanol: Gas obtenido por la degradación anaerobia de residuos orgánicos mediante bacterias, que se puede utilizar como combustible.

Biomasa: Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Estos recursos biomásicos pueden agruparse de forma general en agrícolas y forestales. También se considera biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), y otros residuos derivados de las industrias.

2.4 Marco Contextual

El trabajo se desarrolló en la Sede de Campos Elíseos de la Universidad Francisco de Paula Santander, en el primer piso de los laboratorios de calidad ambiental en el laboratorio de simulación de bioprocesos con una flexibilidad de trabajo remoto y actividad fuera de horarios laborales como lo son los periodos de vacaciones.

2.5 Marco Legal

Modificaciones y Adiciones a la ley 1715 de 2014: ley 2099 10 jul 2021

*Artículo 2. Modifíquese el artículo 1° de la Ley 1715 de 2014, que quedará de la siguiente manera: **Artículo 1. Objeto.** “La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, sistemas de almacenamiento de tales fuentes y uso eficiente de la energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas, en la prestación de servicios públicos domiciliarios, en la prestación del servicio de alumbrado público y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad de abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía y sistemas de medición inteligente, que comprenden tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda”. (Ley 2099 de 2021)*

ARTÍCULO 3. MODIFÍQUESE EL ARTÍCULO 4. DE LA LEY 1715 DE 2014, QUE QUEDARÁ DE LA SIGUIENTE MANERA:

Artículo 4. “Declaratoria de Utilidad Pública e Interés Social. La promoción, estímulo e incentivo al desarrollo de las actividades de producción, utilización,

almacenamiento, administración, operación y mantenimiento de las fuentes no convencionales de energía principalmente aquellas de carácter renovable, así como el uso eficiente de la energía, se declaran como un asunto de utilidad pública e interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar la diversificación del abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección del ambiente, el uso eficiente de la energía y la preservación y conservación de los recursos naturales renovables”. (Ley 2099 de 2021)

Desde el año 2005, en Colombia comenzaron a usarse biocombustibles con el objetivo de bajar las emisiones contaminantes de los combustibles fósiles, tanto de gasolina como de Acpm, mediante el uso del bioetanol, proveniente de la caña de azúcar, y el biodiesel, extraído del aceite de palma. En la actualidad la gasolina debe tener entre un 8 y 10 por ciento de bioetanol, mientras que el Acpm tiene un 10 por ciento en biodiésel. Sin embargo, a raíz de la contaminación en Medellín se comprobó que las cuotas de bioetanol en la gasolina eran del 6 por ciento, por lo cual el Ministerio de Minas y Energía, mediante la resolución 40277 del 4 de abril de 2017, aumentó la oferta de bioetanol en la gasolina del 6 al 8 por ciento en Antioquia.

Proyecto de Ley de 2020 *“Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al goce de un ambiente sano generando medidas tendientes a la reducción de emisiones vehiculares contaminantes provenientes de la gasolina y se dictan otras disposiciones”. Artículo 1°. El objeto establecer medidas tendientes a la reducción de emisiones vehiculares contaminantes provenientes de la gasolina, con el fin de resguardar los derechos fundamentales a la vida, salud y el goce de un ambiente sano”. (Congreso de la República de Colombia, 2020).*

Artículo 5°. “Se busca el fomento a la participación ambiental de universidades, instituciones educativas, comunidades, organizaciones sociales, organizaciones ambientales, y entidades del sector privado, con el fin de propiciar la investigación, la educación ambiental y la generación de alternativas para mejorar la calidad de aire. Se establece que debe estar encaminado a disminuir las emisiones de sustancias contaminantes al aire y prevenir sus efectos en la salud, además de la implementación de sistemas de seguimiento y monitoreo a la calidad del aire. Todo esto, en ejercicio del derecho a la participación ambiental”.

3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

La presente propuesta de estudio se ubica en modalidad de investigación aplicada, ya que por medio de un software de simulación se logró predecir la producción de bioetanol a partir de banano rechazado utilizando levadura floculante, manejando distintas condiciones iniciales de sustrato necesarias con el fin de mejorar este bioproceso.

3.2 Población y Muestra

Se tomaron datos a partir de recopilaciones bibliográficas relacionadas con simulación dinámica de la producción de bioetanol a partir de banano rechazado utilizando levadura floculante.

3.3 Hipótesis

A partir del modelo matemático, mediante los datos obtenidos de la simulación del bioproceso, es posible realizar mejoras al proceso de obtención de bioetanol a partir de banano rechazado utilizando levadura floculante, haciendo posible predecir el comportamiento de este bioproceso para llevar a cabo su futura aplicación a nivel experimental.

3.3. Fases de la Investigación

Los pasos a seguir para la realización de este proyecto son:

- Búsqueda continúa de la información bibliográfica relacionada a través de bases de datos.

- Análisis de la información bibliográfica disponible. Este análisis permitirá la estructuración de este informe, su redacción y la obtención de las conclusiones del mismo que derivarán las propuestas de actuación específicas.
- Proposición de modelo matemático para la biomasa, para el sustrato, para el producto.
- Determinación de parámetros cinéticos.
- Ajustes al código de optimización que permite determinar esos parámetros cinéticos.
- Análisis de los efectos de las condiciones de operación.

4. Desarrollo del Modelado de Producción de Bioetanol

4.1 Expresiones Matemáticas y Constantes Cinéticas

Las expresiones matemáticas propuestas para construir el marco de modelado se basan en un reactor de tipo discontinuo para describir la producción de bioetanol a partir de Banano de rechazo. Estas expresiones están compuestas por ecuaciones de balance de masa para el crecimiento y muerte celular, el consumo de sustrato y la formación de etanol.

En dicho reactor donde se cultiva la levadura para la producción de bioetanol, se pueden generar diferentes condiciones que limitan la viabilidad y el crecimiento de las células, de modo que las células totales se pueden clasificar en células viables y células muertas, como se muestra en la ecuación 1 y 2, respectivamente.

$$\frac{dX_v}{dt} = \mu X_v - K_d X_v \quad \text{Eq. 1}$$

$$\frac{dX_d}{dt} = K_d X_v \quad \text{Eq. 2}$$

Donde; X_v y X_d son las concentraciones de células vivas y muertas, respectivamente. Además, K_d y μ son las tasas de muerte y crecimiento, respectivamente. Este último se calcula utilizando el modelo cinético de Andrews para relacionar el crecimiento de la biomasa con la inhibición del sustrato (Andrews, 1968) y se calcula de acuerdo con la ecuación 3.

$$\mu = \frac{\mu_{max} S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_i}} \quad \text{Eq. 3}$$

Donde μ_{max} es la tasa máxima de crecimiento microbiano, K_s es la constante de saturación y K_i es la constante de inhibición del sustrato.

Los impactos de la glucosa en un sistema por lotes se simulan utilizando la ecuación 4.

$$\frac{dS}{dt} = - \left(\frac{\mu}{Y_x^s} + m_s \right) X_v \quad \text{Eq. 4}$$

Donde; $Y_{x/s}$ es el rendimiento de las células de *Saccharomyces cerevisiae* producidas por unidad de glucosa consumida, m_s es la tasa específica de mantenimiento celular y S es la concentración de sustrato.

Por otra parte, la concentración producida de Bioetanol en un biorreactor es modelada en la ecuación 5.

$$\frac{dP}{dt} = Y_{\frac{P}{x}} \mu X v \quad \text{Eq. 5}$$

Donde; $Y_{P/x}$ es el rendimiento del producto basado en el crecimiento celular, y P es la concentración de Bioetanol.

Finalmente, la ecuación 6. se emplea cuando la biomasa medida a partir de la masa seca representa la cantidad de células viables más células muertas. Esta ecuación es necesaria para igualar la concentración global de células presentes en el experimento en el momento de la medición.

$$X_t = X_v + X_d \quad \text{Eq. 6}$$

Dónde; X_t es la concentración total de células.

5. Resultados y Análisis

5.1 Resultado Modelo Matemático

Las ecuaciones anteriores detallan la cinética de este bioproceso las cuales, por medio de un modelo matemático, describen el comportamiento del mismo. Ahora bien, un modelo cinético no estructurado proporciona información crucial sobre mejoras y optimización de procesos en las primeras etapas (Alvarado, 2022). Con base en estudios previos (Teles, 2017) donde evaluaron datos experimentales para integrarlos en diferentes modelos cinéticos con el objetivo de demostrar cuál es el más apropiado para describir este proceso fermentativo; paralelamente con un procedimiento de parametrización de regresión no lineal utilizando el software Matlab R2022b con la función Matlab Fmincon, se llega a la conclusión que la mejor precisión encontrada entre los datos experimentales y simulados se logra utilizando el modelo cinético de Andrews, ya que este modelo se ajusta a los perfiles de concentración y describe la existencia de inhibición de sustrato, el cual relaciona el crecimiento de la biomasa con la inhibición del sustrato (Andrews, 1968) representado con la ecuación. (3)

El uso de modelos cinéticos permite obtener observaciones fundamentales sobre los procesos metabólicos microbianos y proporcionar una buena aproximación para los casos en los que la composición celular depende del tiempo o la concentración de sustrato es alta en comparación con la constante de saturación (Birol, 1998).

De modo que, esta investigación proyecta la modelación computacional de un bioproceso en modo de operación batch, con el fin de analizar el modo de operación asertivo para una mejor productividad de bioetanol. Por medio de esto se realizó un análisis de las condiciones y parámetros experimentales representados en las tablas 1 y 2, respectivamente; los cuales fueron simulados en el software Matlab R2022b.

Tabla 1. Condiciones y parámetros iniciales utilizados para las simulaciones

Parámetros	Valor	Unidad
X_v	3.43	gL^{-1}
X_d	0.43	gL^{-1}
S_0	90	gL^{-1}
P_0	0.0	gL^{-1}

La tabla 2. Muestra los parámetros cinéticos utilizados para las simulaciones basadas en resultados experimentales.

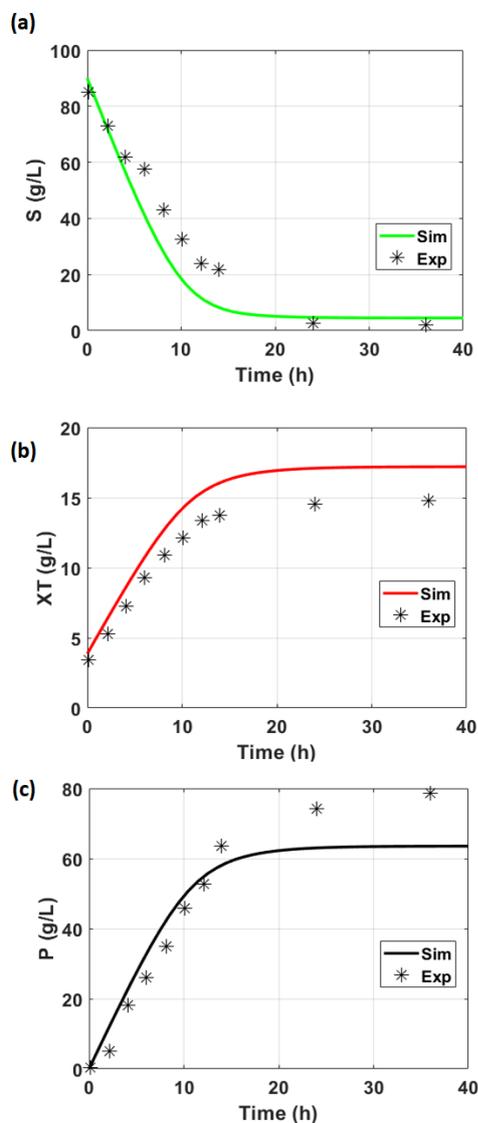
Tabla 2. Parámetros cinéticos simulados

Parámetros	Valor	Unidad
μ_{max}	0.62	h^{-1}
K_s	10.8	gL^{-1}
K_d	0.35	h^{-1}
K_i	1000	gL^{-1}
$Y_{x/s}$	0.1	gg^{-1}
$Y_{p/x}$	4.76	gg^{-1}
m_s	1.0	$gg^{-1}h^{-1}$

Como resultado de la primera simulación se observa en la Figura 1 una leve discrepancia entre los datos simulados y los datos experimentales, esto se evidencia con mayor claridad en la Figura 1c donde se observa que la producción máxima de bioetanol se obtiene en un tiempo aproximado de 36 horas, alcanzando una concentración total de 80 g/L, a diferencia de la simulación obtenida por el software la cual llega a una productividad

máxima de 60 g/L de bioetanol en un tiempo de 40 horas, obteniendo menos concentración en mayor tiempo, un proceso similar muestra la Figura 1a representación gráfica del consumo de sustrato y 1b biomasa total, donde para cada caso los datos experimentales difieren de la simulación, una incoherencia demostrada en la Figura 1b y 1c la cual, según la simulación se obtiene mayor cantidad de células y menor cantidad de producto de modo que los parámetros cinéticos deben calibrarse al proceso.

Figura 1. Modelado sin parametrizar de la producción de bioetanol basado en datos experimentales. Asteriscos (Datos experimentales); Línea sólida (Datos simulados). (a) Sustrato, (b) Biomasa, (c) Producto



La estimación de parámetros cinéticos para aplicaciones de Biocombustibles requiere una gran cantidad de experimentación y tiempo para determinar su influencia en el modelado

matemático. Por estas razones, el modelado de producción de bioetanol podría ser una herramienta esencial para lograr la base para la eficiencia y rentabilidad de la optimización de bioprocesos.

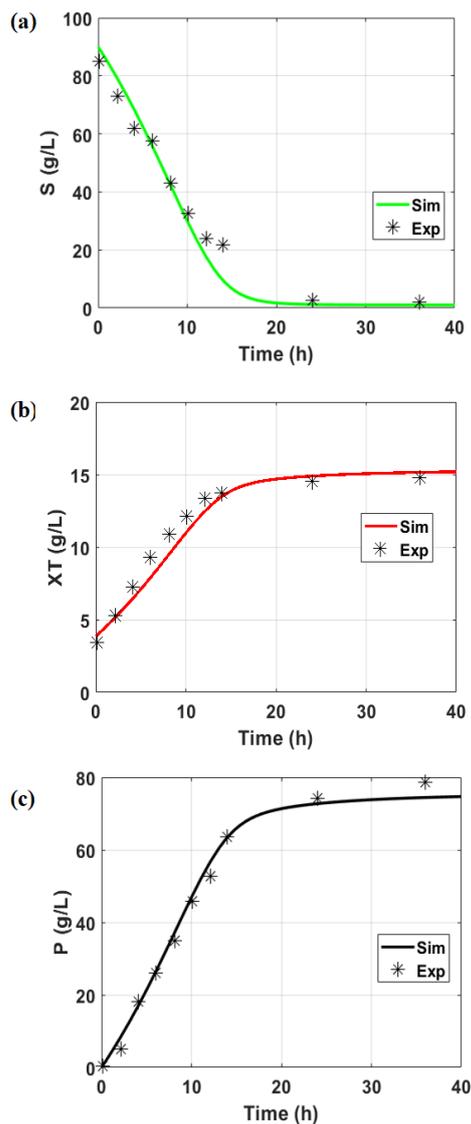
Por consiguiente, se llevó a cabo la calibración de los parámetros cinéticos por medio del software Matlab R2022b para resolver numéricamente el marco matemático propuesto en esta investigación. Además, se utilizó el método numérico Runge-Kutta 45 (Caicedo & Nieto, 2020). Como resultado de lo anterior se obtuvieron los datos que se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros cinéticos parametrizados

Parámetros	Valor	Unidad
μ_{max}	0.22	h^{-1}
K_s	19.3	gL^{-1}
K_d	0.1	h^{-1}
K_i	686	gL^{-1}
$Y_{x/s}$	0.11	gg^{-1}
$Y_{p/x}$	6.59	gg^{-1}
m_s	0.1	$gg^{-1}h^{-1}$

En la figura 2, se observa el resultado obtenido de la simulación hecha después del proceso de calibración, se puede apreciar que el modelo matemático ajustado describe de manera adecuada el comportamiento cinético del microorganismo bajo las condiciones de estudio, es decir, la función Fmincon permitió minimizar la incertidumbre entre los datos experimentales y la simulación. Con base en lo anterior, se puede decir que el modelo matemático establecido en esta investigación para la simulación del crecimiento de la levadura floculante, la formación de bioetanol y el consumo de banano de rechazo (fuente de glucosa) es pertinente para describir este tipo de proceso metabólico.

Figura 2. Modelado parametrizado de la producción de bioetanol basado en datos experimentales. Asteriscos (Datos experimentales); Línea sólida (Datos simulados). (a) Sustrato, (b) Biomasa, (c) Producto.



En efecto se observa en la Figura. 2, un incremento en la precisión del modelo matemático, de manera que, estos resultados son muy prometedores para los bioprocesos, ya que permite un ajuste más significativo en la predicción de condiciones de operación. A su vez, esto contribuye en el ahorro de presupuesto y tiempo de una empresa a gran escala, debido a que se logra minimizar los experimentos a realizar.

Luego de obtener las ecuaciones diferenciales que describen de manera adecuada un proceso de producción de bioetanol a partir de un microorganismo, se puede determinar qué condiciones iniciales de sustrato e inóculo favorecen a la optimización del proceso de

obtención del metabolito de interés; esto se logra por medio de un diseño experimental por niveles, en el cual se buscan las condiciones óptimas en un intervalo de valores conocidos, ya sea por literatura o experimentación.

5.2 Determinación de las Mejores Condiciones de Operación

Para determinar los niveles de sustrato y carga inicial de inóculo que favorecen a la producción de bioetanol se empleó un diseño factorial completo 3^2 , en donde se desarrollaron 9 experimentos. Los niveles de las variables seleccionados fueron tomados como base las condiciones iniciales de estudios previos (Teles, 2017). Las variables y sus niveles fueron: X1, Sustrato (g/L) con nivel bajo de 90, nivel medio de 300 y nivel alto de 510; X2, Biomasa total (g/L), los niveles son 0.43, 1.43 y 3.43. Para las simulaciones se tomó como base el modelo matemático de Andrews con las constantes cinéticas parametrizadas por medio del software Matlab R2022b.

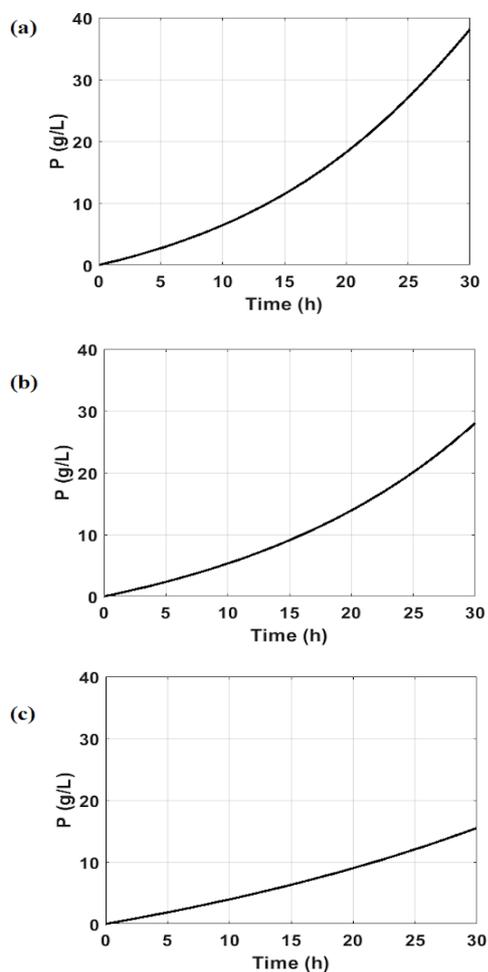
Los resultados de las simulaciones realizadas con los valores propuestos en el diseño experimental por niveles, se pueden observar en la Tabla 5, donde se relaciona el valor máximo de células y producto (Bioetanol) obtenido para cada caso de estudio. Es importante resaltar que los valores negativos (-) en la Tabla 4 representan el nivel bajo, asimismo los valores positivos (+) son referencia al valor más alto o nivel superior del intervalo propuesto. Por otra parte, los valores intermedios del intervalo se representan con el símbolo de multiplicación (*), esto para facilitar el reporte de resultados y a su vez mejorar la comprensión del esquema.

Tabla 4. Diseño factorial completo 3²

N° Exp	X1	X2
1	-	-
2	-	+
3	+	-
4	+	+
5	*	-
6	-	*
7	*	+
8	+	*
9	*	*

Como resultado de la simulación trabajada con una carga inicial de inóculo de 0.43 g/L que es igual a el nivel bajo del intervalo de estudio, se obtuvo que la producción máxima de bioetanol se alcanza cuando la concentración de sustrato inicial es igual a 90 g/L y luego de 30 horas de proceso, alcanzando un valor de 38 ± 1 g/L del producto (ver Figura 3 y 4). Respecto al comportamiento de consumo de sustrato, se puede observar en la figura 4a, que existe mayor consumo, ya que pasa de un valor inicial de 90 g/L a una concentración final de 40 g/L, es decir, más del 50% del sustrato suministrado al sistema ha sido consumido. A diferencia de las otras dos simulaciones, donde se aprecia que la tasa de consumo es menor que en la anterior, este fenómeno se presenta posiblemente por la capacidad del microorganismo para utilizar el sustrato suministrado, en otras palabras, a concentraciones altas de sustrato la levadura satura su metabolismo ocasionando una inhibición en el crecimiento celular y la obtención de bioetanol (Pineda, 2022 & Basallo, 2022).

Figura 3. Efecto del sustrato en la producción de Bioetanol con una concentración de 0.43 (g/L) de inóculo de levadura flocculante. A diferentes concentraciones de Banano de rechazo, (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente



Por lo tanto, para este caso de estudio se puede decir que para una concentración inicial de células igual a 0.43 g/L la mejor concentración de sustrato inicial para suministrar al sistema es igual a 90 g/L. Sin embargo, en comparación con los valores obtenidos en la producción de células totales luego de parametrizar son menores, con una diferencia de 7 g/L (ver Figura 2 y 5).

Figura 4. Consumo de sustrato simulado a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 0.43 g/L de levadura floculante.

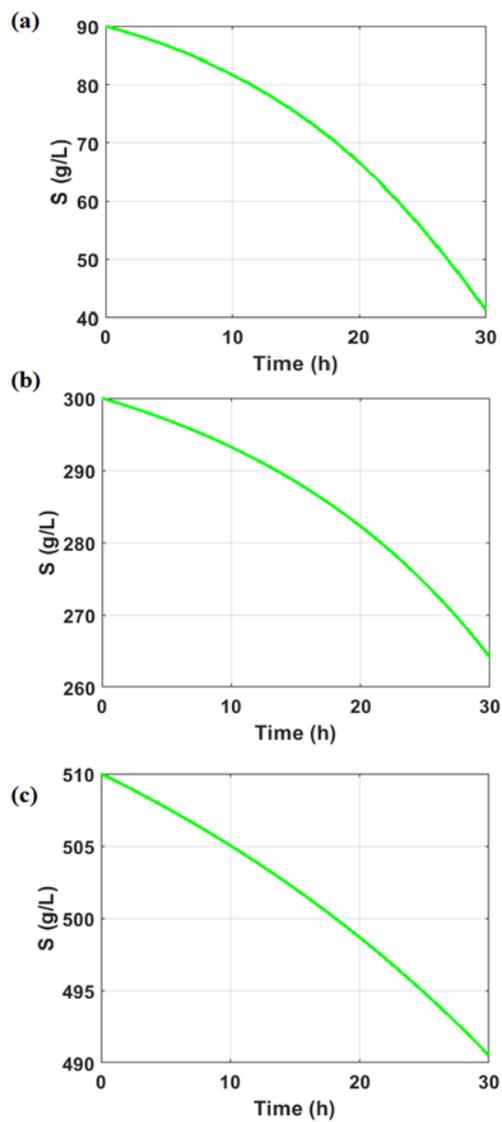
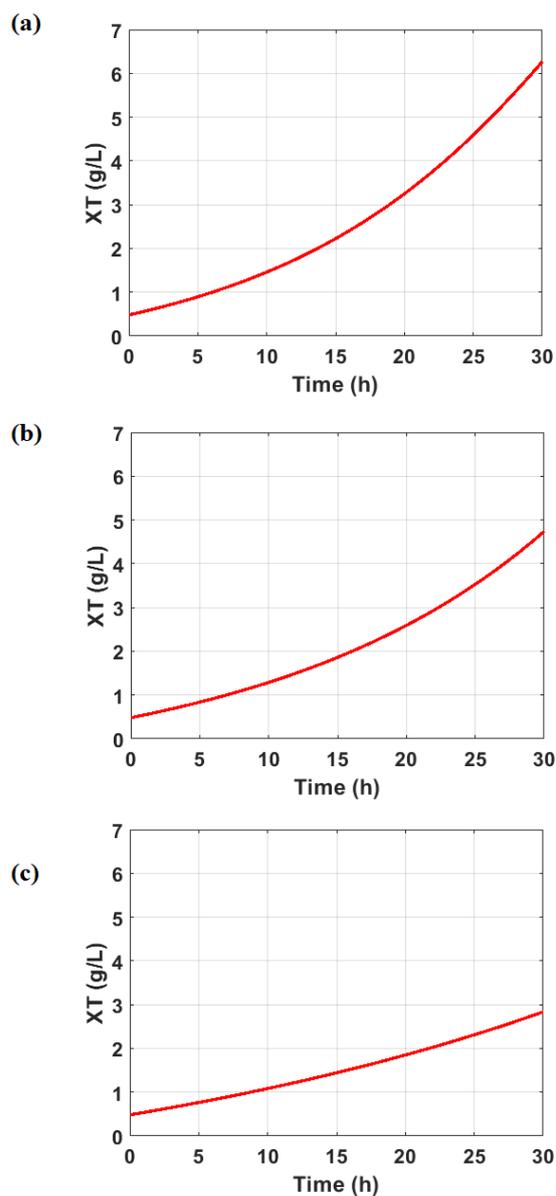


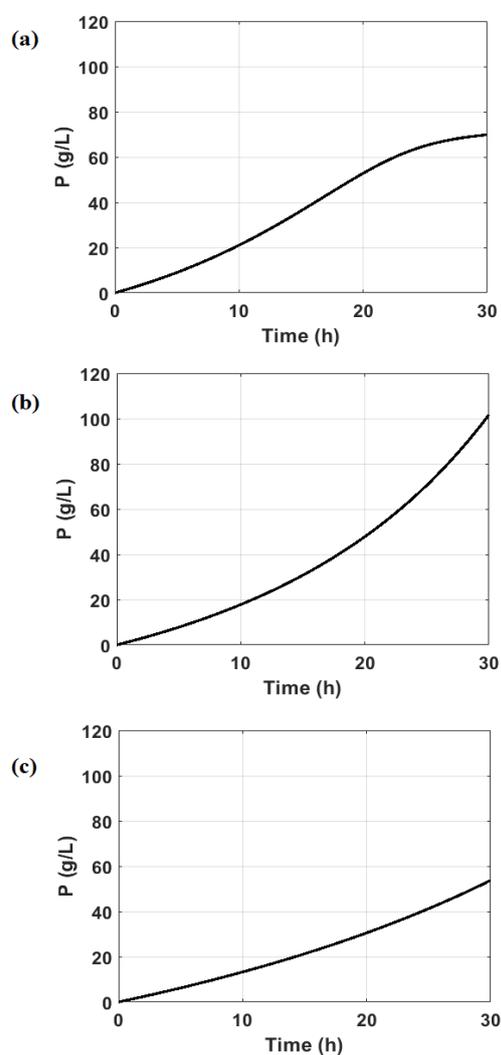
Figura 5. Biomasa total X_t producida ($X_v + X_d$), simulada a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300, (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 0.43 g/L de levadura floculante



En la figura 6, se puede observar cómo la concentración de inóculo juega un papel importante en la producción de bioetanol, ya que se obtiene mayor producción en comparación con los valores alcanzados en la simulación del nivel bajo de células iniciales; mostrando una diferencia de 40 g/L de bioetanol entre simulación. Estos resultados evidencian una clara relación entre la concentración de inóculo y sustrato, ya que la diferencia

entre el valor de producción alcanzado en la figura 6a y la figura 6b es más de 20 g/L luego de más de 25 horas de proceso. No obstante, investigaciones reportan que la tasa de dilución del metabolito de interés juega un papel de suma importancia al momento de cuantificar la producción total de bioetanol, debido a la capacidad del microorganismo para asimilar el sustrato y así evitar una saturación e inhibición del producto por exceso de glucosa en el medio de cultivo.

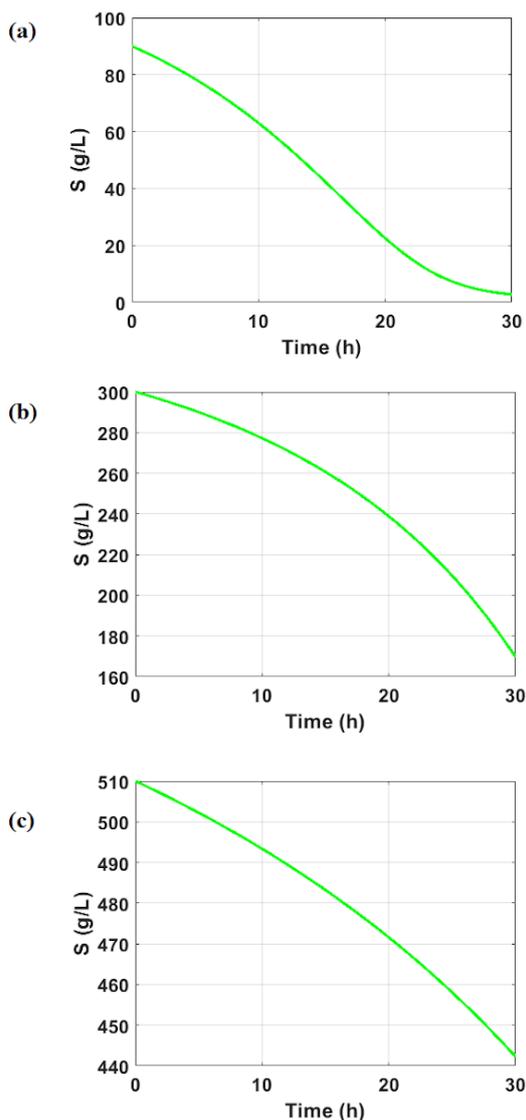
Figura 6. Efecto del sustrato en la producción de Bioetanol con una concentración de 1.43 (g/L) de inóculo de Levadura Floculante. A diferentes concentraciones de Banano de rechazo, (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente.



Por otra parte, el consumo de sustrato para esta simulación muestra una diferencia interesante entre cada ensayo. En la figura 7a y 7b se puede observar como la carga inicial de

inóculo (1.43 g/L) afecta de manera directa en el sustrato consumido, ya que mientras un ensayo alcanza a llegar a cero luego de las 30 horas de operación el otro disminuye de manera constante a través del tiempo, pero su concentración final es de 160 g/L, es decir, solo se consume el 47% del sustrato inicial.

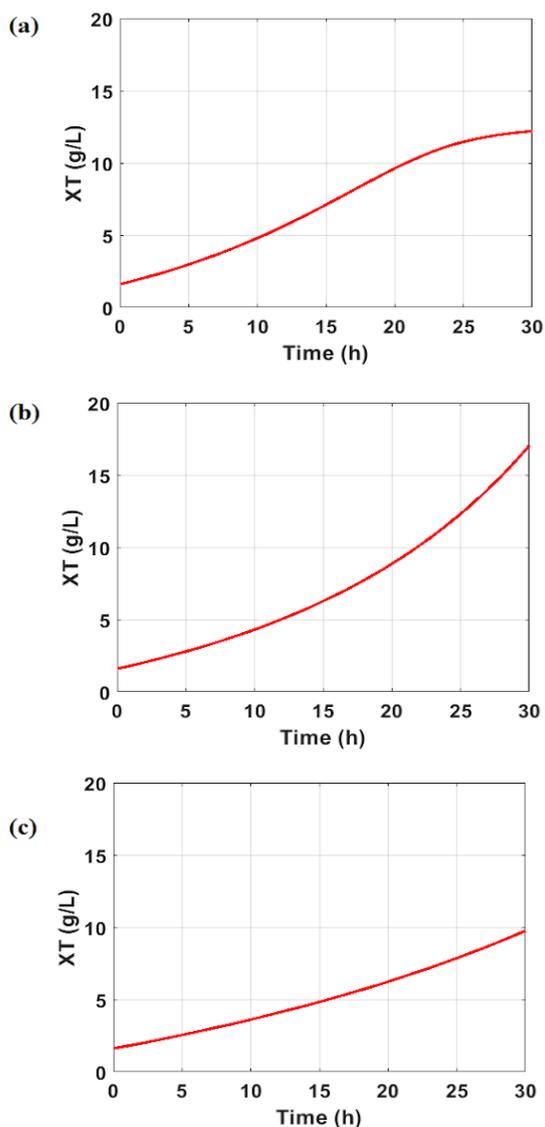
Figura 7. Consumo de sustrato simulado a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de Inóculo de 1.43 g/L de Levadura floclante.



En términos económicos este proceso bajo las condiciones estudiadas no muestra una gran rentabilidad, ya que los ensayos con 300 y 510 g/L de sustrato revelan que la tasa de consumo es menor a 45%, por lo tanto, se está desperdiciando alrededor de 160 g/L y 440 g/L, respectivamente de la concentración de azúcares del medio de cultivo. Además, el

rendimiento del producto respecto al sustrato es deficiente y se encuentra por debajo de múltiples estudios que reportan tasas de conversión por encima de 0.38 (Meléndez, 2022)

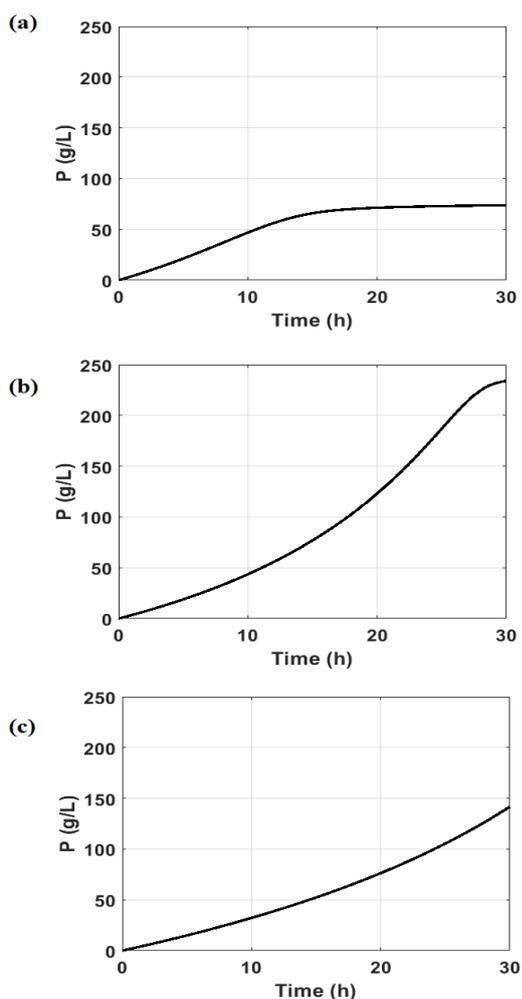
Figura 8. Biomasa total X_t producida ($X_v + X_d$), simulada a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 1.43 g/L de levadura flocculante.



Para las últimas tres simulaciones se tomó como carga de inóculo inicial un valor igual a 3.43 g/L. En cuanto a la producción de bioetanol con un sustrato inicial de 90 g/L se alcanzó un valor por encima de 70 g/L de producto; al comparar este valor con el obtenido partiendo de una concentración inicial de azúcares fermentables igual a 510 g/L, se observa una mayor producción en el segundo ensayo (ver Figura 9). Sin embargo, en la figura 10 se puede

apreciar que en el ensayo de 510 g/L el consumo a las 30 horas de operación no es total. Caso contrario al ensayo de 90 g/L, donde después de las primeras 20 horas de proceso se presenta un consumo total de la fuente de carbono.

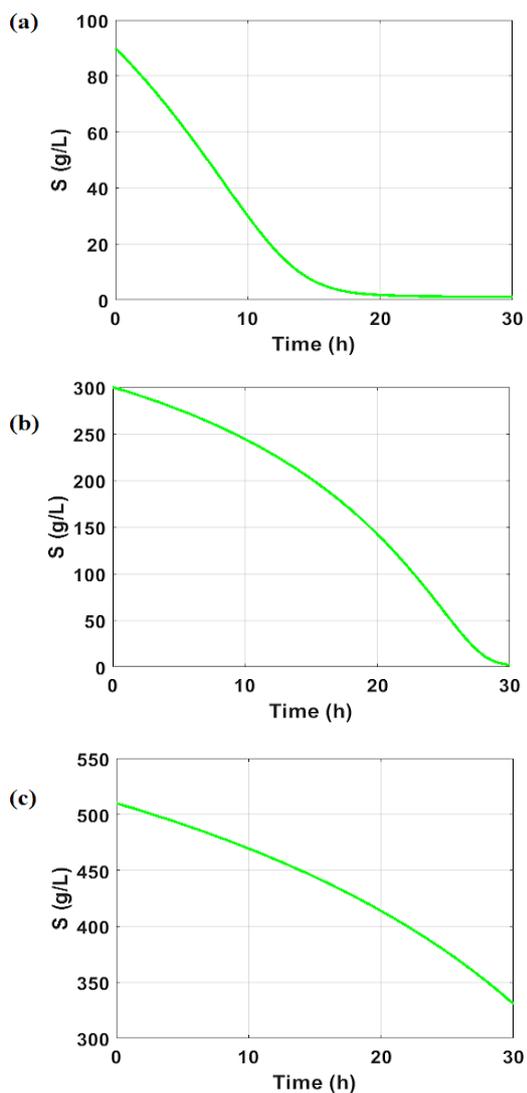
Figura 9. Efecto del sustrato en la producción de Bioetanol con una concentración de 3.43 (g/L) de inóculo de Levadura floculante. A diferentes concentraciones de Banano de rechazo, (a) 90, (b) 300 y (c) 500 g/L, respectivamente.



Cuando se comparan las tres simulaciones, se puede visualizar que el mejor comportamiento de consumo de sustrato, producción de células y bioetanol se da en la simulación que tiene como parámetros iniciales 300 g/L de sustrato y 3.43 g/L de células (ver Figura 10 y 11). En esta simulación la producción máxima de bioetanol llegó a un valor por encima de 200 g/L siendo la mayor concentración de todas las simulaciones, del mismo

modo, la concentración celular llegó a un valor de 39 g/L aproximadamente, siendo significativamente superior a las anteriores concentraciones obtenidas.

Figura 10. Consumo de sustrato simulado a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300, (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 3.43 g/L de Levadura floculante



Con respecto a la figura 10b, se observa que el sustrato después de las 30 horas de proceso llega a cero, es decir, hay una conversión completa del sustrato en biomasa y producto respectivamente. Además, la figura 11b muestra una curva de crecimiento celular donde se puede observar las fases de un cultivo (latencia, exponencial y estacionaria) y a su vez, observar el estado dinámico del microorganismo en la producción de bioetanol.

Figura 11. Biomasa total X_t producida ($X_v + X_d$), simulada a diferentes concentraciones de Banano de rechazo: (a) 90, (b) 300 y (c) 510 g/L, respectivamente. Con una concentración de inóculo de 3.43 g/L de Levadura floculante

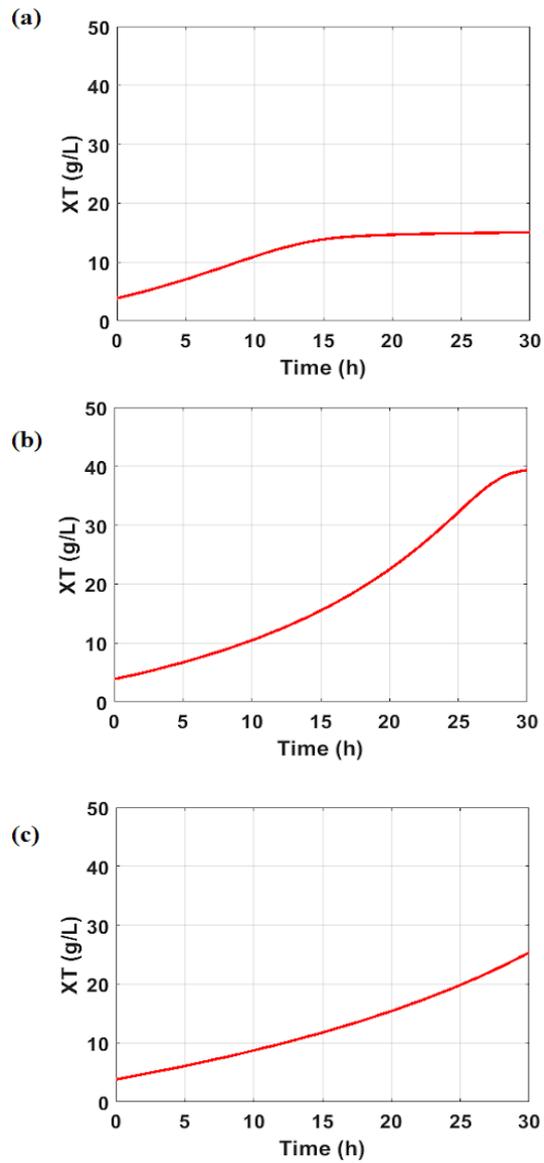


Tabla 5. Resultados promedio de Bioetanol obtenido por cada simulación

N° Exp	X1	X2	Bioetanol máximo (g/L)	Biomasa Final (g/L)
1	90	0.43	38	6.2
2	90	3.43	75	15
3	510	0.43	15	2.8
4	510	3.43	140	25
5	300	0.43	27	4.8
6	90	1.43	70	12
7	300	3.43	230	39
8	510	1.43	53	9
9	300	1.43	101	16

Con base en lo anterior, y de acuerdo con la tabla 5, se puede decir que las mejores condiciones iniciales para la puesta en marcha de este bioproceso son cuando el valor de sustrato y carga de inóculo son iguales a 300 g/L y 3.43 g/L respectivamente. Por otra parte, la producción de biomasa aumenta al duplicar los niveles de banano rechazado, alcanzando un valor máximo de biomasa de 39 g/L utilizando alrededor de 300 g/L de sustrato como materia prima. Estos hallazgos indican una relación directa entre la biomasa producida y el grado de materia prima invertido en la producción de levadura que puede ser de gran importancia en estudios técnico-económicos para la obtención de proteína unicelular a gran escala utilizando fuentes de materia prima no convencionales. Estos datos obtenidos a través de la simulación pueden ser necesarios para planificar las operaciones de la unidad de bioseparación después del proceso de fermentación, ya que la logística operativa es vital en el bioprocésamiento a gran escala. (Pacheco, 2020 & Hernández, 2020). Desde otra perspectiva, una concentración de 510 g/L del sustrato inicial podría desencadenar problemas de inhibición y eficiencia en la conversión del sustrato. Lo anterior, teniendo en cuenta que solo se lograría un consumo de

azúcar de solo el 36% aproximadamente (ver figura 10c), de tal forma que se desperdiciaría más de la mitad de la materia prima, y se evidenciarían los sobrecostos durante la producción de bioetanol a partir de banano rechazado. De modo que, de acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo matemático propuesto captura exitosamente los efectos de inhibición por sustrato debido a que, a concentraciones de 510 g/L de banano de rechazo, se observa una reducción considerable en la concentración de etanol. Esto se debe a que los niveles de bioetanol alcanzan valores de solo 100 g/L cuando se utiliza la mayor concentración de azúcares. Los resultados obtenidos del diseño experimental por niveles, aportan de manera demostrativa a la importancia de conseguir una relación adecuada entre la cantidad de células iniciales y la concentración de sustrato suministrado, ya que las curvas de crecimiento celular, producción de bioetanol y consumo de sustrato oscilan en diferentes valores dependiente siempre de las condiciones de operación inicial. Estos comportamientos de las figuras coinciden con estudios donde reportan la importancia de conocer el nivel de asimilación de los microorganismos al sustrato utilizado para la producción de bioetanol (Cunha, 2020).

De acuerdo con el estudio realizado por Hawaz en 2023 entre mayor sea el porcentaje de inóculo inicial, mayor será la cantidad de etanol obtenido. Asimismo, Korzen y Osano en 2015 reportan una mejoría en la obtención de bioetanol al aumentar el inóculo inicial; pasando de una tasa de conversión del 33% a una de 75% después de 24 horas de fermentación. A nivel estadístico estudios reportan la significancia ($p < 0.05$) de la concentración celular en el rendimiento del bioproceso (Mostafa, 2022). Los resultados anteriores concuerdan con los obtenidos mediante las simulaciones hechas en Matlab R2022b para el presente estudio matemático. Por otro lado, estudios de Hamuda en 2015 reportan que existe una correlación negativa entre la concentración de azúcares fermentables en el medio cultivo y el rendimiento de bioetanol, lo que significa que un balance entre la concentración de sustrato y la capacidad del microorganismo para asimilar el mismo son claves para obtener

mayor producción de bioetanol. Sin duda, la concentración que puede resultar en niveles prometedores para la industria del bioetanol a partir de banano rechazado es operar el biorreactor en modo discontinuo a 300 g/L por un tiempo no superior a las 30 horas de fermentación y una concentración de inóculo de 3.43 g/L. De acuerdo con lo anterior, el modelo matemático obtenido logra tener en cuenta varios aspectos importantes para describir de manera adecuada la producción de bioetanol.

Conclusiones

La ecuación diferencial permitió describir la tasa de crecimiento celular, concluyendo así que, el modelo de Andrews, fue el que mejor se ajustó al sistema de ecuaciones. Una vez se obtuvieron las ecuaciones y parámetros cinéticos óptimos, se realizó un estudio por niveles que permitió conocer qué incidencia tiene la concentración de sustrato y células al inicio del proceso. Luego de realizarse las nueve simulaciones se obtuvo que, las mejores condiciones de operación para la obtención de bioetanol a partir de levadura floculante son cuando la concentración de azúcares fermentables es igual a 300 g/L y la carga inicial de células es igual a 3.43 g/L; las simulaciones permitieron observar la influencia de estos factores en la síntesis del metabolito de interés. También permitieron mejorar el proceso de obtención a partir de las condiciones anteriormente mencionadas, logrando que la concentración final de bioetanol superará los 200 g/L en menos de 35 horas de proceso, de modo que el modelo cinético propuesto para simular el bioproceso fue capaz de describir con precisión la dinámica de producción de bioetanol por una levadura floculante, creciendo sobre un sustrato de banano rechazado, con una concentración de azúcar entre 90 y 510 g/L, deduciendo así que la concentración inicial más óptima para este bioproceso es de 300 g/L del sustrato.

Finalmente, el uso de modelos matemáticos para describir la cinética de los microorganismos es una gran herramienta para obtener información relevante sobre diversos procesos metabólicos. Asimismo, permite realizar optimizaciones a dichos procesos sin necesidad de gastos experimentales y mantiene una correlación de los datos obtenidos por simulación con los reportados por otros estudios a escala real, además de esto el uso de banano de rechazo se convierte en un sustrato prometedor para las fermentaciones alcohólicas y obtención de biocombustibles. El banano de rechazo presentó un alto potencial de uso como sustrato en los procesos fermentativos para la producción de bioetanol. Con este sustrato se

alcanzaron altos rendimientos en relación con los valores experimentales reportados, lo que lo convierte en un sustrato promisorio para las fermentaciones alcohólicas y en la obtención de biocombustibles.

Recomendaciones.

En cuanto a los factores que influyen en el comportamiento cinético del microorganismo se recomienda para futuros investigadores, evaluar los parámetros de temperatura y pH, bajo las condiciones óptimas de crecimiento celular de *Saccharomyces cerevisiae* con la propiedad de floculación.

Bibliografía

- Abril, A. y Navarro, E. (2012). Etanol a partir de biomasa lignocelulósica.
- Alvarado, K; Lilibeth, N; and Gelves G. (2022). Kinetic modeling of biosurfactant production from crude oil using *Bacillus subtilis* cells, South African Journal of Chemical Engineering, Volume 41, 2022, Pages 176-181, ISSN 1026-9185, <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.06.009>.
- Andrews J. (1968). A Mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. *Biotechnology and Bioengineering* 10(6) 707
- Ansar, Nazaruddin, Atri Dewi Azis, Ahmad Fudholi, (2021). Enhancement of bioethanol production from palm sap (*Arenga pinnata* (Wurmb) Merr) through optimization of *Saccharomyces cerevisiae* as an inoculum, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 14, Pages 548-554, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.085>.
- Araque J, Niño L and Gelves G. (2020) Industrial Scale Bioprocess Simulation for *Ganoderma Lucidum* Production using Superpro Designer *Journal of Physics: Conference Series* 1655 012077
- Basallo; G., Romero; G., Nicolás; S. (2022) Diseño conceptual de una planta de producción de bioetanol a partir del rastrojo de maíz en el departamento de Cundinamarca doi: <http://52.0.229.99/handle/20.500.11839/9060>
- Bello A, Morales K, Sanchez L, Lidueñez V, Leal A and Gelvez G; (2020). Computational Implementation of Required Industrial Unit Operations For Bio-Plastic Production From Starch Extracted from Banana Peels by Aerobic Fermentation Using *Rizophus Oryzae* *Journal of Physics: Conference Series* 1655 012078

Birol G, Doruker P, Kirdar B et al (1998). Mathematical description of ethanol fermentation by immobilised *Saccharomyces cerevisiae*. *Process Biochem* 33:763–771. doi:10.1016/S0032-9592(98)00047-8

Caicedo Y, Suarez C and Gelves G. (2020). Evaluation of preliminary plant design for *Chlorella vulgaris* microalgae production focused on cosmetics purposes *Journal of Physics: Conference. Series* 1655 012086

Carmona, R; Lienqueo, M; Salazar, O; y García A. (2009). Bionergy I I: Biological pretreatment with fungi as a tool for improvement of the enzymatic saccharification of *Eucalyptus globules Labill* to obtain bioethanol. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*,7:(1). doi:<https://doi.org/10.2202/1542-6580.1935>.

Conesa, C., Seguí, L. & Fito, P. (2013). *Sacarificación de residuos industriales de piña con mezclas de enzimas comerciales*. Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo- Universitat Politècnica de Valencia. Camino de Vera s/n. 46022-Valencia (España).

Congreso de la Republica de Colombia. (20 de julio de 2020). Proyecto de Ley de 2020 “Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al goce de un ambiente sano generando medidas tendientes a la reducción de emisiones vehiculares contaminantes provenientes de la gasolina y se dictan otras disposiciones”. <http://www.andi.com.co/Uploads/PL%20053-20%20Emisiones%20Vehiculares.pdf>

Congreso de la República. (10 de julio de 2021) " por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. "

<https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202099%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202021.pdf>

Gerena, F. (2013). Obtención de jarabes azucarados a partir de la hidrólisis química de residuos de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis* var valencia) y papa (*Solanum tuberosum* var diacol capiro) para ser empleados como edulcorantes en la industria de alimentos. (Tesis de Pregrado). Escuela de Ciencias Básicas Tecnológicas e Ingeniería, Duitama. España.

Godoy-Salinas, A.J., Ortiz-Muñiz, B., Rodríguez, (2021). J.G. *et al.* Bioethanol production by *S. cerevisiae* ITV-01 RD immobilized on pre-treated sugarcane bagasse. *Biomass Conv. Bioref.* <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01602-x>

Guevara C, Acevedo J, Peláez C; (2014). Isolation and characterization of flocculant yeast to produce ethanol from banana refuse. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustria* 12(2) 151

Güiza-Suárez, L; Rodas, J; Cifuentes-Guerrero, J; y González, J. (2019). Energías renovables no convencionales y cambio climático. Editorial Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia.

Hamed I. Hamouda, Hussein N. Nassar, Hekmat R. Madian, Salem S. Abu Amr, and Nour Sh. El-Gendy. (2015). Response Surface Optimization of Bioethanol Production from Sugarcane Molasses by *Pichia veronae* Strain HSC-22. Doi: <https://doi.org/10.1155/2015/905792>

Hamouda, R.A., Sherif, S.A., Dawoud, (2016). G.T.M. *et al.* Enhancement of bioethanol production from *Ulva fasciata* by biological and chemical saccharification. *Rend. Fis. Acc. Lincei* 27, 665–672 <https://doi.org/10.1007/s12210-016-0546-2>

- Hawaz, E., Tafesse, M., Tesfaye, (2023). A. *et al.* Optimization of bioethanol production from sugarcane molasses by the response surface methodology using *Meyerozyma caribbica* isolate MJTm3. *Ann Microbiol* 73, 2. <https://doi.org/10.1186/s13213-022-01706-3>
- Hernandez S, Niño L, Gelves L (2020). Simulación del aumento de escala del crecimiento microbiano en un biorreactor de tanque agitado para procesos aeróbicos mediante dinámica de fluidos computacional *Journal of Physics: Serie de conferencias*165501210
- Hernández, C. (2017). Obtención de bioetanol a partir de hidrolizados de residuos de fruta. (Tesis de Maestría). Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- Ibañez A, Rolon Y and Gelves G (2020). Evaluating Cost-Effective Culture Media for Nutraceuticals Production from Microalgae Using Computer-Aided Large Scale Predictions *Journal of Physics: Conference. Series* 1655 012082
- Jesus R. Melendez, Bence Mátyás, Sufia Hena, Daniel A. Lowy, Ahmed El Salous, (2022). Perspectives in the production of bioethanol: A review of sustainable methods, technologies, and bioprocesses, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 160, 112260, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112260>.
- Joana T. Cunha, Pedro O. Soares, Sara L. Baptista, Carlos E. Costa & Lucília Domingues (2020) Engineered *Saccharomyces cerevisiae* for lignocellulosic valorization: a review and perspectives on bioethanol production, *Bioengineered*, 11:1, 883-903, DOI: 10.1080/21655979.2020.1801178
- Juhi Sharma, Vinod Kumar, Rajendra Prasad, Naseem A. Gaur, (2022). Engineering of *Saccharomyces cerevisiae* as a consolidated bioprocessing host to produce cellulosic ethanol: Recent advancements and current challenges, *Biotechnology Advances*,

Volume 56, 107925, ISSN 0734-9750,
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107925>.

Leor Korzen, Indra Neel Pulidindi, Alvaro Israel, Avigdor Abelsona and Aharon Gedanken. (2015). Single step production of bioethanol from the seaweed *Ulva rigida* using sonication. Doi: <https://doi.org/10.1039/C4RA14880K>

Malagón, M; Paéz, A; Muñoz, A; Santos, J; y Zabala, D. (2017). Producción de bioetanol a partir de diferentes mezclas de los residuos orgánicos generados en una empresa de alimentos. Fundación Universidad de América. Revista de Investigación 10 (1): 47-59 ISSN 2011-639X

Minagricultura. (2020). CADENA DE PLÁTANO, Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales.

Mostafa M. El-Sheekh, Mohammed Y. Bedaiwy, Aya A. El-Nagar, Medhat ElKelawy, Hagar Alm-Eldin Bastawissi, (2022). Ethanol biofuel production and characteristics optimization from wheat straw hydrolysate: Performance and emission study of DI-diesel engine fueled with diesel/biodiesel/ethanol blends, *Renewable Energy*, Volume 191, Pages 591-607, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.076>.

Naseeha A. Chohan, G.S. Aruwajoye, Y. Sewsynker-Sukai, E.B. Gueguim Kana, (2020), Valorisation of potato peel wastes for bioethanol production using simultaneous saccharification and fermentation: Process optimization and kinetic assessment, *Renewable Energy*, Volume 146, Pages 1031-1040, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.042>.

Nieto L, Rivera C and Gelves G (2020) Economic Assessment of Itaconic Acid Production from *Aspergillus Terreus* using Superpro Designer *Journal of Physics: Conference Series* 1655 012100

- Nitin Mahendra Chauhan, Sunil Tulshiram Hajare, Buzuayehu Mamo, Abreham Assefa Madebo, (2021). "Bioethanol Production from Stalk Residues of Chiquere and Gebabe Varieties of Sweet Sorghum", *International Journal of Microbiology*, vol. 2021, Article ID 6696254, 16 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/6696254>
- Osano, Aloys Mosima. (2015). Cellulosic ethanol synthesis from wheat straw and gallants soldier using indigenous basic mineral salt hydrolytic regimes. Doi: <http://ir.jkuat.ac.ke/handle/123456789/1764>
- Pacheco S, Niño L y Gelves G (2020). Producción de antitrombina recombinante a partir de *Saccharomyces cerevisiae*: Tendencias a gran escala basadas en predicciones computacionales *Journal of Physics: Serie de conferencias* 1655012081
- Pineda, A Monroy. (2022). Estrategias de aprovechamiento del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) hacia la producción de bioetanol GAC. *Ciencia en Desarrollo*, - revistas.uptc.edu.co
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente; (2020). Informe sobre la brecha en las emisiones del 2020. ISBN: 978-92-807-3812-4 Número de trabajo: DEW/2310/NA. Extraído de: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34438/EGR20ESS.pdf?sequence=35>
- Romero, H; Macías, C; Palacios, A; Redrovan, F. (2019). Kinetic study of bioethanol production from agroindustrial residues of ripe banana peel *Industrial Data*, vol. 22, no. 1, 2019, -July Universidad Nacional Mayor de San Marcos Perú
- Sarel J.M. Malherbe, Rosemary A. Cripwell, Lorenzo Favaro, Willem H. van Zyl, Marinda Viljoen-Bloom, (2023). Triticale and sorghum as feedstock for bioethanol production

via consolidated bioprocessing, *Renewable Energy*, Volume 206, Pages 498-505, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.047>.

Selvakumar Periyasamy, J. Beula Isabel, S. Kavitha, V. Karthik, Badr A. Mohamed, Desta Getachew Gizaw, P. Sivashanmugam, Tejraj M. Aminabhavi, (2023). Recent advances in consolidated bioprocessing for conversion of lignocellulosic biomass into bioethanol – A review, *Chemical Engineering Journal*, Volume 453, Part 1, 139783, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139783>.

Silva, P. y Oliveira, S. de (2014). Exergy analysis of pretreatment processes of bioethanol production based on sugarcane bagasse. *Energy*, 76, 130-138.

Suárez-Machín, Caridad; Garrido-Carralero, Norge Antonio; Guevara-Rodríguez, Carmen Amarilys. (2016). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de alcohol. Revisión bibliográfica ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 50, núm. 1, enero-abril, 2016, pp. 20-28 Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Ciudad de La Habana, Cuba

Tejeda, L; Tejeda, C; Villabona. A; Alvear, M; Castillo, C; Henao, D; Marimón, W; Madariaga, N., y Tarón, A. (2010). Producción de bioetanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y piña. *Revista Educación en Ingeniería*, 5(10):120-125.

Teles A, Meneses E, Ceccato S, Marques S, Ponte M and Rocha L; (2017). Mathematical modeling of cashew apple juice ethanol fermentation by flocculating yeast: effect of initial substrate concentration and temperature. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 40(8) 1221

Thangavelu, S., Saleh, A. y Nasir, F. (2016). Review on bioethanol as alternative fuel for spark ignition engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 820-835.

United Nations Environment Programme (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Nairobi.
<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>

Verstrepen, K.J. and KLIS, F.M. (2006). Flocculation, adhesion and biofilm formation in yeasts. *Molecular Microbiology*, 60(1), p. 5–15.