



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i6.2360>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de investigación

*Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae**

*Design of a bioreactor for fermentation of carambola (*Averrhoa carambola*) from *Saccharomyces cerevisiae**

*Projeto de um biorreator para fermentação de carambola (*Averrhoa carambola*) de *Saccharomyces cerevisiae**

Luis David Loor-Salvador ^I

luisdavid.loor@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4069-7629>

Vicente Danton Velasco-Bravo ^{II}

vidanvelasco@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3405-4889>

Rodolfo Andrés Rivadeneira-Zambrano ^{III}

rodolfo.rivadeneira@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-9707-7084>

Ramón Eudoro Cevallos-Cedeño ^{IV}

ramon.cevallos@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8583-4674>

Correspondencia: luisdavid.loor@gmail.com

***Recibido:** 30 de agosto de 2021 ***Aceptado:** 22 de septiembre de 2021 * **Publicado:** 26 de Octubre de 2021

- I. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador
- II. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador
- III. Magister en Ingeniería Industrial Y Productividad Msc, Master Universitario en Tecnología Ambiental, Ingeniero Químico, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- IV. Magister en Procesamiento de Alimentos, Doctor dentro del Programa de Doctorado en Ciencia, Tecnología y Gestión Alimentaria, Ingeniero Agroindustrial, Tecnólogo en Agroindustrias, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Resumen

La fermentación alcohólica se basa en la capacidad que tienen ciertos microorganismos para tomar una ruta metabólica anaerobia y producir dióxido de carbono y etanol; uno de estos microorganismos es la *Saccharomyces cerevisiae*, a partir de la cual se realizó la fermentación de los azúcares del carambolo, que es una fruta originaria de Indonesia y Malasia, cuya composición química representa un ambiente propicio para el desarrollo de la *Saccharomyces cerevisiae*. En este trabajo se realizó el diseño de un biorreactor para la fermentación del carambolo a escala industrial, partiendo desde un análisis de la capacidad de la *Saccharomyces cerevisiae* para fermentar los azúcares del sustrato, haciendo uso de simulaciones realizadas en el entorno de Simulink de Matlab, considerando el rendimiento de dióxido de carbono generado en las reacciones de fermentación, con y sin cáscara. A lo largo de este trabajo, se detallan las condiciones tomadas para las reacciones de fermentación, las que fueron consideradas para el diseño del biorreactor, así como también los cálculos realizados que demuestran las ventajas en cuanto al rendimiento de los productos principales de llevar a cabo la fermentación del carambolo con cáscara, las variaciones que se presentan al realizar el mismo proceso sin cáscara.

Palabras clave: carambolo; fermentación; *Saccharomyces cerevisiae*; biorreactor.

Abstract

Alcoholic fermentation is based on the ability of certain microorganisms to take an anaerobic metabolic pathway and produce carbon dioxide and ethanol. One of these microorganisms is *Saccharomyces cerevisiae*, from which the fermentation of sugars from carambolo, a fruit native to Indonesia and Malaysia, whose chemical composition represents a favorable environment for the development of *Saccharomyces cerevisiae*, was carried out. In this work, the design of a bioreactor for the fermentation of carambolo on an industrial scale was carried out, starting from an analysis of the capacity of *Saccharomyces cerevisiae* to ferment the sugars of the substrate, making use of simulations carried out in the Simulink environment of Matlab, considering the yield of carbon dioxide generated in the fermentation reactions, with and without peel. Throughout this work, the conditions taken for the fermentation reactions, which were considered for the design of the bioreactor, are detailed, as well as the calculations performed that demonstrate the advantages, in

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

terms of the yield of the main products, of carrying out the fermentation of the carambolo with shell and the variations that occur when the same process is carried out without shell.

Keywords: carambolo; fermentation; *Saccharomyces cerevisiae*; bioreactor.

Resumo

A fermentação alcoólica é baseada na capacidade de certos microrganismos de seguir uma rota metabólica anaeróbica e produzir dióxido de carbono e etanol; Um desses microrganismos é o *Saccharomyces cerevisiae*, a partir do qual foi realizada a fermentação dos açúcares da carambola, fruta nativa da Indonésia e da Malásia, cuja composição química representa um ambiente propício ao desenvolvimento da *Saccharomyces cerevisiae*. Neste trabalho foi realizado o projeto de um biorreator para fermentação de carambola em escala industrial, a partir de uma análise da capacidade de *Saccharomyces cerevisiae* em fermentar os açúcares do substrato, utilizando simulações realizadas no ambiente Simulink. do Matlab, considerando o rendimento de dióxido de carbono gerado nas reações de fermentação, com e sem casca. Ao longo deste trabalho são detalhadas as condições assumidas para as reacções de fermentação, as quais foram consideradas para a concepção do bioreactor, bem como os cálculos efectuados que demonstram as vantagens em termos de desempenho dos principais produtos a realizar. carambola com casca, as variações que ocorrem ao realizar o mesmo processo sem casca.

Palavras-chave: carambolo; fermentação; *Saccharomyces cerevisiae*; biorreator.

Introducción

En la actualidad, el consumo de bebidas alcohólicas se ha caracterizado por ser un producto de alta aceptación en el mercado nacional e internacional. Según estudio realizado por la Cervecería AmBev en el año 2007, en el Ecuador se consumen 300 millones de litros de cerveza al año, lo que equivale a un total de 25 litros per cápita; por este motivo, resulta de gran interés el sector de bebidas alcohólicas y el funcionamiento del proceso de fermentación a escala industrial. (Carvajal y Insuasti, 2010).

La fermentación alcohólica es el proceso anaeróbico mediante el cual se hidroliza el azúcar de un sustrato para formar dióxido de carbono y alcohol etílico. A lo largo de los años, distintos científicos alrededor del mundo han estudiado el proceso de fermentación, estableciendo los conceptos bases del

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

fenómeno, como es el caso de J. Gay – Lussac, que en 1815 estableció la fórmula de la fermentación. El proceso de fermentación se fundamenta en la capacidad que tiene el microorganismo *Saccharomyces cerevisiae* para fermentar los azúcares del sustrato, en el caso de este trabajo el carambolo. (Winchonlong, 2018).

Por su parte, Gonzáles (2017) menciona que:

Por cada 100 g de glucosa, se producen aproximadamente 51.1 g de etanol y 48.9 g de dióxido de carbono, además de establecer que la fermentación requiere un tiempo de 7 a 10 días y debe ser realizada a una temperatura relativamente baja, alrededor de 20°C; no obstante, diversos estudios han evidenciado que con permitir que se lleve a cabo en un ambiente fresco es suficiente. (p.109)

Según Pájaro et al. (2018) el carambolo presenta una combinación de vitamina C y ácido oxálico. Cien gramos de fruta contienen 0.38 g de proteína, 0.08 g de grasa, aproximadamente 0.85 g de fibra, resultando una excelente fuente de potasio (1169.25 mg) y contribuye con cantidades pequeñas de otros minerales, como cobre (0.325 mg), calcio (31.8 mg), magnesio (94.2 mg), hierro (3.7 mg) y sodio (0.6 mg). En su composición también encontramos azúcares reductores (2% en peso) y azúcares totales (2% en peso). Asimismo, se conoce que, por cada 100 g de fruta, se tienen aproximadamente 3.1 g de glucosa, el cual es un carbohidrato imprescindible para la fermentación. (Velisek, 2016).

Winchonlong (2018) menciona que la carambola presenta además otro tipo de vitaminas, como la vitamina E (0.37 mg/100 g), vitamina B1 (0.03 mg/100 g), vitamina B2 (0.03 mg/100 g), vitamina B3 (0.41 mg/100 g) y vitamina B6 (0.10 mg/100 g). Es importante mencionar que todas las cantidades antes mencionadas varían en dependencia del estado de maduración de la fruta. Por su parte, Gonzáles (2017) resalta la importancia de la vitamina B1, ya que resulta un valioso factor de crecimiento en los medios de fermentación con levaduras.

El microorganismo utilizado fue *Saccharomyces cerevisiae*, el cual presenta un crecimiento adecuado entre 15 a 25°C y un pH en el rango 3.5 a 5.5. Las fuentes de carbono más adecuadas son glucosa, fructosa, sacarosa y maltosa. En este trabajo, se puso a prueba la capacidad de la *Saccharomyces cerevisiae* para fermentar los azúcares presentes en la carambola, pues si bien el fruto reúne las condiciones propicias para el desarrollo del mismo, no existe una certeza sobre la cantidad de azúcares que realmente fueron transformados en los productos propios de la fermentación, aunque se han citado varias referencias teóricas, puesto que es bien conocido que en la práctica la realidad puede ser

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

completamente distinta. Es por ello que en este trabajo se midió la cantidad de dióxido de carbono que se produce en la fermentación de la fruta de carambolo, permitiendo obtener mediante relaciones estequiométricas, las proporciones del resto de los productos obtenidos y el rendimiento real de la fermentación generada por la *Saccharomyces cerevisiae*, información que a su vez nos permite realizar el diseño del biorreactor.

Para realizar el diseño de un biorreactor, es necesario describir el mecanismo de la reacción de la forma más precisa posible, utilizando modelos matemáticos; no obstante, tal y como lo mencionan Ortega et al. (2016), existen múltiples criterios para el diseño de los biorreactores, donde cada uno de ellos presenta pros y contras. En este trabajo, tomamos como premisa la importancia de la operación física de mezcla para determinar el éxito del bioproceso, tal y como lo explica Doran, en su obra *Bioprocess Engineering Principles*, publicada en 2013, al fundamentar que las fermentaciones son bioprocursos en donde se produce una mezcla de fluidos, de una o varias fases, con diferentes reologías, en donde la eficiencia de la reacción dependerá del control de acceso de las células a los nutrientes y oxígeno disueltos. Trabajos como los de Cremades y Lázaro (2016) concuerdan con el impacto que tiene el proceso físico de mezcla en la eficacia de la reacción de fermentación. No obstante, es importante destacar que la agitación ejercida al fluido genera fuerzas hidrodinámicas que pueden llegar a producir daños en las células, razón por la cual resulta de suma importancia la reología del medio.

El objetivo de este trabajo fue diseñar un biorreactor para la fermentación de carambolo a escala industrial, partiendo de un análisis de la capacidad que tiene la *Saccharomyces cerevisiae* para fermentar los azúcares del sustrato, con la ayuda del entorno de “Simulink” de Matlab, en donde se desarrolló la simulación del proceso de fermentación para la *Averrhoa carambola* bajo condiciones específicas, permitiendo obtener resultados rápidos que pueden contribuir en una reducción de los costos de producción y en el mejoramiento del proceso de fermentación; todo esto mediante la realización de pruebas del sistema, en condiciones que, en otras circunstancias, serían demasiado peligrosas o lentas.

Metodología

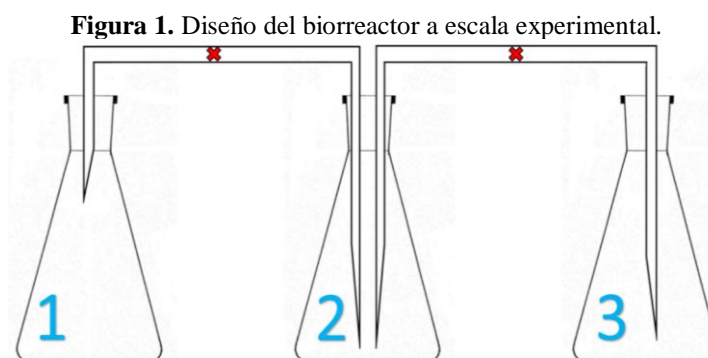
El diseño del biorreactor a escala industrial fue realizado a partir de los criterios propuestos por Doran (2013), donde a partir de un volumen determinado se desarrollan las relaciones para obtener todas las

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

dimensiones del biorreactor. El criterio aplicado para la selección del volumen de trabajo del biorreactor se basó en el rendimiento de la reacción de fermentación del fruto de carambola, el mismo que se obtuvo mediante la determinación de los coeficientes de la reacción. El cálculo de los coeficientes se realizó mediante la medición de la generación del dióxido de carbono propio de la reacción de fermentación, para lo cual se desarrolló un sistema con un biorreactor experimental que permitiera cuantificar el dióxido de carbono producido.

Los frutos de carambola utilizados en este trabajo fueron elegidos de forma aleatoria, tomando únicamente como consideración un estado de maduración intermedio; es decir, que se encuentre en condiciones óptimas para consumo con un promedio de 7.2°Brix. El sustrato fue sometido a un lavado con agua destilada y posteriormente a baño María para eliminar cualquier tipo de microorganismo que pueda establecer una relación negativa con la *Saccharomyces cerevisiae*. Para ambas fermentaciones, la fruta, con y sin cáscara, se pasó a través de un procesador de alimentos con la finalidad de obtener una fase líquida, que representó el extracto de la fruta y, una sólida, que representó la cáscara. Para el caso de la fermentación sin cáscara, se introdujo en el biorreactor solo la fase líquida, desechando todos los sólidos que pudieran quedar en el procesador. Por el contrario, para la fermentación con cáscara se añadió la fase sólida al biorreactor. (Alfaro y Muñoz, 2013)

A escala experimental, se trabajó con el mismo diseño de biorreactor tanto para la fermentación con cáscara como para la fermentación sin cáscara, esto se realizó para descartar la posibilidad de que el diseño del biorreactor influya de alguna forma en las fermentaciones. El diseño del biorreactor a escala experimental, se realizó considerando que el objetivo del mismo sería la medición del CO₂ generado durante la reacción de fermentación. En la figura 1 se puede apreciar el diseño del biorreactor considerado para el desarrollo experimental.



Fuente: Autoría propia.

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

El primer recipiente representa al biorreactor, en el cual se depositó el sustrato y el microorganismo, que para este fin fueron los azúcares de la carambola y la levadura; en el segundo recipiente se añadió agua en un volumen determinado y, el tercer recipiente, estuvo vacío. Todos los recipientes se encontraron conectados a través de mangueras de plástico de PVC tal y como se observa en la figura 1, donde la x representa la válvula de retención. Con este diseño lo que se buscó es que el CO₂, producido en la reacción de fermentación que se generó en el biorreactor, pase por medio de una manguera al segundo recipiente, en donde gracias a la presión generada por el CO₂, el agua contenida en el segundo recipiente fluye, por una segunda manguera, al tercer recipiente. Es importante destacar que todos los recipientes se encontraron rotulados de tal manera que, era posible apreciar rápidamente cualquier variación en el volumen, facilitando la medición del agua desplazada con respecto al tiempo lo que a su vez se relaciona con el volumen de CO₂ generado en la reacción. En ambos casos, la fermentación se llevó a cabo en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 25°C). Se añadió la levadura en base a la proporción establecida por Gonzáles (2017) en su trabajo relacionado con los principios de elaboración de cervezas artesanales, donde establece que “por cada 20 L de mosto se deben añadir aproximadamente 11 g de levadura”. (p.124)

Para ambas fermentaciones se utilizó la ecuación general de los gases ideales con el fin obtener las moles de CO₂ de cada reacción a partir del volumen de gas producido. En base a las relaciones entre los moles de CO₂ y los azúcares del carambolo se calculó el coeficiente estequiométrico del CO₂ en cada una de las ecuaciones, a partir de los cuales se realizaron sistemas de ecuaciones para encontrar los valores de los demás coeficientes, los cuales posteriormente fueron utilizados para calcular los coeficientes biomasa-sustrato ($Y_{(X/S)}$) y producto-sustrato ($Y_{(P/S)}$), que se relacionan con los coeficientes biomasa-sustrato máximo ($Y_{(X/S \text{ máx})}$) y producto-sustrato máximo ($Y_{(P/S \text{ máx})}$), para establecer los rendimientos de las reacciones en base a la cantidad de biomasa y etanol generados. Es importante añadir que, los coeficientes $Y_{(X/S \text{ máx})}$ y $Y_{(P/S \text{ máx})}$, fueron calculados considerando los máximos termodinámicos. (Doran, 2013)

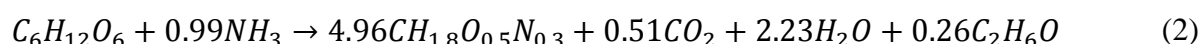
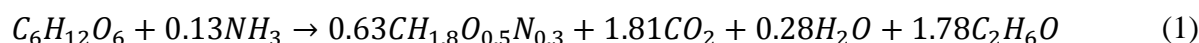
Posteriormente, se planteó una cantidad de producción, la misma que sirvió como base para el diseño del biorreactor a escala industrial. Es importante resaltar que el trabajo de investigación fue desarrollado bajo las consideraciones del método científico y que todos los cálculos involucrados fueron realizados a través de sistemas de cómputos numéricos como: Excel y Matlab; también se

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

incluyó una simulación del proceso de fermentación por medio de la plataforma Simulink de Matlab vR2019a (Massachusetts, USA).

Resultados

A continuación, se muestran las ecuaciones estequiométricas para las reacciones químicas de fermentación del carambolo con y sin cáscara:



Como se puede observar, la reacción de fermentación con cáscara representada por la ecuación (1), muestra mayor cantidad de moles de dióxido de carbono por cada mol de glucosa, esto en contraste con la ecuación (2) que representa la reacción de fermentación del carambolo sin cáscara. A partir de los coeficientes estequiométricos de las ecuaciones (1) y (2), fueron calculadas las relaciones biomasa sustrato y, los requerimientos energéticos para ambas fermentaciones. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Relaciones producto/sustrato de la reacción de fermentación del carambolo.

Fermentación	Coefficientes determinados mediante balance	Máximos termodinámicos	Rendimiento
Con cáscara	$Y_{\frac{C_2H_6O}{C_6H_{12}O_6}} = Y_P = 0.4548888889$	$Y_{\frac{C_2H_6O}{C_6H_{12}O_6}}^{m\acute{a}x} = Y_P^{m\acute{a}x} = 0.511445636$	88.94%
Sin cáscara	$Y_{\frac{C_2H_6O}{C_6H_{12}O_6}} = Y_P = 0.0664444444$		12.99%

Fuente: Autoría propia.

Como se puede observar en la tabla 1, el rendimiento de la reacción de fermentación sin cáscara es sumamente bajo con respecto al de la fermentación con cáscara, motivo por el cual se diseñó el biorreactor tomando en consideración únicamente el mecanismo de reacción que presentó el mayor rendimiento. Por este motivo, la fermentación de carambolo con cáscara utilizando los criterios antes mencionados, establece un volumen de 70.8769 m^3 que permita generar 1.2886 m^3 de etanol. En este sentido, considerando las recomendaciones para el diseño de los biorreactores planteados en el

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

libro de Bioprocess Engineering Principles de Doran (2013), se plantea un biorreactor de 5.15 m de altura total y 4.4854 m de diámetro total y altura del líquido, con la finalidad de que cumpla con las relaciones de $H_L/D_T \wedge D_i/D_T$, establecidas por Doran (2013). Vale destacar que, pese a que el volumen requerido es de 70.8769 m^3 se trabaja con un tanque de un volumen un poco mayor, debido a que el medio tiende a aumentar su volumen en los primeros días de fermentación y se deja este espacio extra para que la presión generada por el medio no dañe el reactor.

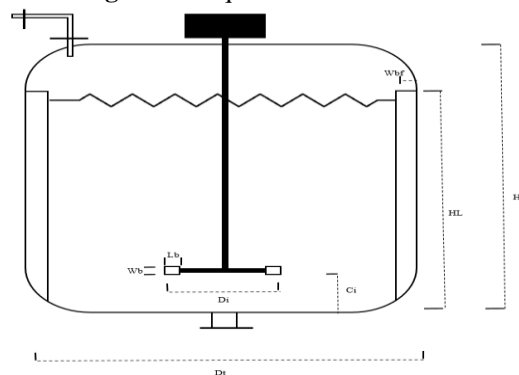
Tabla 2 Medidas de diseño del biorreactor.

Parámetro	Valor
H_T	5.15 m
H_L	4.4854 m
V_L	70.8769 m^3
V_T	81.3780 m^3
D_T	4.4854 m
D_i	1.4802 m
W_B	0.2960 m
L_B	0.3701 m
W_{BF}	0.4485 m
C_i	1.1214 m

Fuente: Autoría propia.

Dónde: H_T hace referencia a la altura total del biorreactor, H_L especifica la altura que ocupa el líquido en el biorreactor, V_L se refiere al volumen del líquido, V_T es el volumen total del biorreactor, D_T es el diámetro total del biorreactor, D_i es el diámetro del impelente, W_B es el espesor del impelente, L_B es el largo del impelente, W_{BF} es la pared interna del biorreactor y C_i es la altura a la que estará colocado el impelente con respecto al fondo del tanque.

Figura 2. Esquema del biorreactor.



Fuente: Autoría propia.

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

Es importante resaltar que se diseñó el reactor con un pequeño sistema de tuberías en la parte superior que permita el ingreso de los reactivos y a su vez cumpla la función de salida de dióxido de carbono, en caso de que la presión generada por el gas supere las capacidades del reactor. Estas tuberías son controladas mediante dos válvulas de tipo mariposa, representadas como dos líneas negras en el diagrama, y se abrirían en caso de que el manómetro del reactor indique una presión de gas inadecuada, permitiendo que el exceso del gas sea retirado para poder ser almacenado en un tanque y ser aprovechado en otro proceso. Además, se plantea un sistema de escape en la parte inferior que permita retirar el producto una vez finalice el proceso de fermentación sin necesidad de una bomba, además de reducir la posibilidad de pérdida del producto en el proceso de extracción del mismo.

Discusión

Tanto la reacción de fermentación como el diseño de un biorreactor dependen en gran medida del criterio o criterios a los que se les dé prioridad, ya que el número de variables inmersas en ambos procesos es elevado. En lo referente a la reacción de fermentación, en este trabajo se priorizó la generación de CO₂ como un referente de la cantidad de etanol que se estaría produciendo en la fermentación de los azúcares del carambolo. No obstante, tal y como se puede observar en los resultados, el cálculo de los coeficientes de la reacción se realizó en torno a la presencia de la glucosa, mas no de otros carbohidratos como la sacarosa y fructosa. Esto es debido a la afinidad que tiene la *Saccharomyces cerevisiae* por la glucosa, pues en trabajos como los de Argote et al. (2015), se demuestra que, en los procesos de fermentación realizados con esta levadura, la glucosa es el monosacárido más consumido y por ende aquel que queda en menor proporción. Otros autores, como Cremades y Lázaro (2016), coinciden en el criterio del análisis de la reacción de fermentación en base a la cantidad de glucosa del medio, ya que otros azúcares, como la sacarosa y la maltosa, al ser hidrolizados terminan generando más moléculas de glucosa, por lo que resulta más factible realizar el análisis partiendo desde aquel carbohidrato que tiene mayor relevancia en el resultado final.

Por su parte, para el diseño del biorreactor se dio prioridad a la debida homogeneización del medio, tomando en consideración la reología del mismo. Cremades y Lázaro (2016) aplicaron el mismo criterio en su trabajo, planteando el volumen del biorreactor en base a la capacidad de producción de su sustrato y suministrando un adecuado sistema de agitación, mediante el uso de un impelente tipo Rushton. Vale destacar que para la fermentación de carambolo se debería emplear el mismo tipo de

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

impelente, no solo por el hecho de que la turbina tipo Rushton es la más adecuada para procesos de fermentación, sino también porque la viscosidad del medio es relativamente baja, aproximadamente 0.8 Pa.s, y por ende encaja dentro de las especificaciones de este tipo de impelente. No obstante, a diferencia de este trabajo, Cremades y Lázaro (2016) añaden al diseño de su biorreactor un sistema de aireación, mismos que son utilizados para aumentar la concentración de etil acetato, que es un éster de gran relevancia, ya que este tipo de compuestos intervienen en el aroma frutal que presentan las bebidas provenientes del proceso de fermentación.

De manera similar, Escalante et al. (2014) exponen en su investigación que, el proceso de aireación en el mosto promueve una mayor síntesis de etil acetato por lo que resulta favorable para el proceso de generación de alcohol cuando este se incorporará al expendio de bebidas. Sin embargo, los mismos autores también exponen que altas concentraciones de etil acetato, generan efectos negativos en la calidad de los vinos aportando olor y aroma desagradable. Además, es de suma importancia mencionar que, el proceso de aireación de 10 mL de aire/L tiene un efecto negativo en el crecimiento de *Saccharomyces Cerevisiae*; por lo tanto, es necesario agregar otra especie de levadura que pueda continuar en el proceso como: *Brettanomyces intermedius*, que puede tolerar mayores concentraciones (al 0.075% de ácido acético), tal y como lo explican Abbott et al. (2005). Debido a esto, en la fermentación realizada en el presente trabajo, el proceso de aireación que se llevó a cabo en *Saccharomyces cerevisiae* fue el de distribución de aire dentro del biorreactor con la ayuda de agitación, manteniendo un ambiente anaerobio que produjo rendimientos favorables de etanol (88.95%).

Tal y como se pudo apreciar en los resultados, el rendimiento de la fermentación del carambolo con cáscara resultó mucho mayor que el de la fermentación del carambolo sin cáscara. Esta afirmación tiene su respaldo considerando que, la reacción de fermentación sin cáscara presentó mayor producción de biomasa, lo cual tiene sentido tomando en cuenta que la *Saccharomyces cerevisiae* posee más de una ruta metabólica, por lo que al encontrarse más fácilmente con los nutrientes que necesita y, dejando de lado los componentes como la fibra, le fue más fácil adaptarse al medio y empezar a multiplicarse, adoptando una ruta metabólica diferente a la que usualmente toma para generar dióxido de carbono. Dicho resultado fue similar al obtenido por Decheco (2016), en donde obtuvo un alto rendimiento de etanol al fermentar cáscara de piña, demostrando que los procesos de fermentación se ven favorecidos cuando se usa la cáscara del fruto.

Diseño de un biorreactor para la fermentación de carambolo (*Averrhoa carambola*) a partir de *Saccharomyces cerevisiae*

Bajo lo planteado anteriormente, la producción de alcohol de carambolo con cáscara resulta rentable; sin embargo, lo que hace una atractiva fuente de inversión, es la cantidad de materia prima a disposición, pues tal y como lo mencionaron Cárdenas y Rodríguez (2003), en una hectárea se puede llegar a obtener una abundante cosecha de hasta 60 toneladas de fruta, aunque otros autores, como Arroyo (2010), establecen que el rendimiento de producción promedio es de 28000 a 32000 kg/ha. Pese a la alta producción del fruto, el mismo no tiene una gran difusión en el mercado interno y no registra exportaciones, pudiendo añadir valor a una propuesta de negocios a partir de la carambola, trabajos que en realidad ya han sido analizados en los últimos años por autores como Balladares y Guamán (2019).

Conclusiones

Se logró diseñar el biorreactor a partir de la relación producto sustrato con el fin de establecer las condiciones apropiadas de escalado del biorreactor, el cual sin lugar a duda no está obligado a mantener un vínculo con los datos que mostró la fermentación debido a que, estos podrían variar en función del criterio de escalado a utilizar. En este sentido, hay que resaltar el hecho de que el biorreactor está diseñado para realizar una correcta homogeneización; sin embargo, esto no significa que al llevar a cabo el proceso no se presenten problemas en algún otro parámetro, como podría ser el pH del medio o una sobre concentración de etanol que inhiba el correcto desarrollo de la *Saccharomyces cerevisiae*.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, las consideraciones tomadas y las conclusiones planteadas, es de vital importancia mencionar que, este trabajo no representa de ninguna forma un estudio concluyente con respecto al rendimiento que presentó la reacción de fermentación del carambolo con y sin cáscara. Esto debido a que el análisis de los resultados, podría realizarse desde diferentes perspectivas o, aplicando otros métodos que posean menor rango de incertidumbre para el estudio de la generación de alcohol. Como se pudo observar, la mayor parte de los análisis realizados se basaron en los resultados obtenidos mediante los cálculos estequiométricos de las reacciones, lo cual podría estar alejado de la realidad, razón por la cual este trabajo podría ser tomado como referencia para futuros ensayos, pudiendo afirmar o corregir los valores obtenidos en esta investigación mediante el uso de equipos y métodos más precisos.

Referencias

1. Abbott, D. y Ingledew, W. (2005). The importance of aeration strategy in fuel alcohol fermentations contaminated with *Dekkera/Brettanomyces* yeasts. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 69, 16-21. doi:10.1007/s00253-005-1927-0
2. Alfaro, M. y Muñoz, M. (2013). Evaluación de la pulpa concentrada de Carambola (*Averrhoa carambola* L.) A tres concentraciones de azúcar y dos temperaturas para la elaboración del yogurt frutado. Universidad Nacional del centro del Perú, Tesis.
3. Argote, F., Cuervo, R., Osorio, E., Delgado, J. y Villado, H. (2015). EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MELAZA CON CEPAS NATIVAS *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(2), 40-48.
4. Arroyo, D. (2010). ESTUDIO DEL USO COMBINADO DE RADIACIÓN UV-C Y EMPACADO AL VACÍO PARA AUMENTAR LA VIDA POSCOSECHA DE CARAMBOLA (*Averrhoa carambola* L.) MÍNIMAMENTE PROCESADA. Universidad Tecnológica Equinoccial, Tesis.
5. Balladares, H. y Guamán, B. (2019). PLAN DE NEGOCIO DE UNA EMPRESA PRODUCTORA Y EXPORTADORA DE JUGO DE CARAMBOLA ENDULZADO CON STEVIA A PARIS, FRANCIA. Universidad de Guayaquil, Tesis.
6. Cárdenas, J. y Rodríguez, A. (2003). Producción y exportación de la carambola orgánica en la Península de Santa Elena. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Tesis.
7. Carvajal, M. y Insuasti, M. (2010). ELABORACIÓN DE CERVEZA ARTESANAL UTILIZANDO CEBADA (*Hordeum vulgare*) Y YUCA (*Manihot Esculenta* Crantz). Universidad Técnica del Norte, Tesis.
8. Cremades, O. y Lázaro, V. (2016). Diseño de un biorreactor para la fabricación de la cerveza. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Tesis.
9. Decheco, A. (2016). APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE *Ananas comosus* (PIÑA) PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL POR VÍA FERMENTATIVA DE *Saccharomyces cerevisiae*. Universidad Le Cordon Bleu, Tesis.
10. Doran, P. (2013). *BIOPROCESS ENGINEERING PRINCIPLES* (Segunda ed.). United Kingdom: Elsevier.

11. Escalante, E., Waldir, D., Mojmír, R., Karel, M., Torres, F., Calixto, R., . . . Chávez, Y. (2014). Efecto de la aireación en la producción de compuestos volátiles por cultivo mixto de *Brettanomyces intermedius* y *Saccharomyces cerevisiae* durante la fermentación de sidra. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 5-14.
12. González, M. (2017). *Principios de la elaboración de las cervezas artesanales*. North Carolina: Lulu Enterprises.
13. Ortega, F., Alvarez, H. y Botero, H. (2016). Enfrentando el modelado de bioprocesos: una revisión de las metodologías de modelado. *ION*, 73-90. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revionv30n1-2017006>
14. Pájaro, H. B. (2018). Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica de un Vino de Frutas a base de Tamarindo (*Tamarindus indica* L.) y Carambola (*Averrhoa carambola* L.). *Información tecnológica*, 29(5), 123-130.
15. Velisek, J. (2016). *The Chemistry of food* (Segunda ed.). Czech Republic, Wiley Blackwell.
16. Winchonlong, R. (2018). EVALUACIÓN DE LOS FACTORES RELACIÓN PULPA-AGUA, CORRECCIÓN DE °BRIX Y CORTE DE FERMENTACIÓN, PARA LA OBTENCIÓN DE UNA BEBIDA ALCOHÓLICA FERMENTADA ORGANOLÉPTICAMENTE ACEPTABLE A PARTIR DE (*Averrhoa carambola* L.) “CARAMBOLA” EN CHULUCANAS”. tesis, 1-138.

©2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).