

## RESUMEN

La biomasa residual no ha sido totalmente valorada y aprovechada en Ecuador desde el punto de vista energético, sin embargo, representa un alto potencial energético [1]. El objetivo de este estudio fue el uso del software Aspen Custom Modeler (ACM) para modelar la producción de bioetanol generado en la fermentación de mucilago de Cacao CCN – 51 aplicando el modelo cinético de *Andrews y Levenspiel* [2].

## INTRODUCCIÓN

Las fuentes fósiles primarias de energía han sido y son la fuerza impulsora del desarrollo económico [3], sin embargo, debido al volátil mercado mundial de energía y las crecientes preocupaciones ambientales, los combustibles alternativos como los biocombustibles han recibido mucha atención como reemplazos de los combustibles fósiles [4].

El modelo cinético de *Andrews y Levenspiel* tiene en cuenta el fenómeno de la inhibición mixta por sustrato y producto y con el uso de módulos especializados en Aspen Custom Modeler® (ACM) de Aspentech, es posible desarrollar simulaciones en estado estable y dinámico [2].

## MÉTODOS

El residuo mucilaginoso de cacao CCN-51 corresponde a la zona geográfica 6 del Ecuador. Esta variedad se utilizó debido a su mayor productividad en el Ecuador.

La fermentación alcohólica se llevó a cabo en un biorreactor homogéneo de tipo *batch* con una agitación constante de 250 rpm y utilizando levadura del tipo *Saccharomyces Cerevisiae*. La cuantificación de sustrato se realizó por el método fenol-ácido sulfúrico en un espectrofotómetro UV y luz visible de marca Ciba-Corning 2800. Las levaduras se cuantificaron por conteo directo y los pesos de células secas se determinaron mediante secado por liofilización, en un liofilizador FT 33 marca Armfield. La cuantificación del bioetanol durante la experimentación se realizó por el método de Winnick o microdifusión [7]. (Figura 1)



Figura 1. Fermentación y evaluación de sección experimental

El modelo de *Andrews y Levenspiel* incluye términos para la inhibición del sustrato y del producto (Ecuación 1). Utilizando la misma filosofía, se considera un modelo de formación de producto como se evidencia en (Ecuación 2). Las ecuaciones 3, 4 y 5 se utilizan para describir la tasa de crecimiento de levadura, velocidad de producción de alcohol y el consumo de sustrato respectivamente.

$$\mu = \left( \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_{IS}}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{P_E}{P_{X,max}} \right)^\alpha \quad (\text{Ec.1}) \quad q_E = \left( \frac{q_{max} \cdot S}{K_{SE} + S + \frac{S^2}{K_{IE}}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{P_E}{P_{E,max}} \right)^\beta \quad (\text{Ec.2})$$

Biomass growth rate.

$$\frac{dX}{dt} = X \left( \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_{IS}}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{P_E}{P_{X,max}} \right)^\alpha \quad (\text{Ec.3})$$

Bioethanol production rate.

$$\frac{dP_E}{dt} = X \left( \frac{q_{max} \cdot S}{K_{SE} + S + \frac{S^2}{K_{IE}}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{P_E}{P_{E,max}} \right)^\beta \quad (\text{Ec.4})$$

Substrate consumption rate.

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y_{X/S}} \left( \frac{dX}{dt} \right) + \frac{1}{Y_{P/S}} \left( \frac{dP_E}{dt} \right) + mX \quad (\text{Ec.5})$$

Los ajustes se realizaron empleando el método de mínimos cuadrados no lineales de *Levenberg-Marquardt* y método de *Runge-Kutta* de tercer orden (ODE23) en MATLAB.

## RESULTADOS

El tiempo óptimo de fermentación para producción de biomasa y bioetanol fue de 36 horas a una temperatura de 35 °C, pH de 4 y concentración de levadura de 3 g/L. Aspen Custom Modeler resultó una herramienta útil para construir una unidad personalizada de fermentación. El correcto método de discretización, permitió obtener parámetros cinéticos y concentraciones de etanol, levadura y azúcares semejantes a las experimentales y a las obtenidas con MATLAB. (Tabla 1)

Tabla 1. Parámetros cinéticos para la simulación del modelo *Andrew y Levenspiel*.

Parámetro	Nomenclatura	Valor	Unidad
$\mu_{max}$	Tasa de crecimiento específico máximo	0.3250	h <sup>-1</sup>
$q_{max}$	tasa máxima de producción específica de etanol	2.4258	h
$K_S$	Constante de <i>Monod</i> para el crecimiento	1	g/L
$K_{SP}$	Constante de saturación de etanol	39.4844	g/L
$K_{IS}$	Constante de inhibición de los azúcares para el crecimiento	900	g/L
$K_{IP}$	Constante de inhibición del sustrato para la formación de etanol	101	g/L
$Y_{X/S}$	Rendimiento a biomasa	0.1594	g/g
$Y_{P/S}$	Rendimiento a etanol	0.1493	g/g
$m$	Coefficiente de mantenimiento de la celda	1x10 <sup>-5</sup>	h <sup>-1</sup>
$P_{X,max}$	Concentración máxima de etanol para el crecimiento	24	g/L
$\alpha$	Constante de inhibición de etanol	1.4937	g/L
$\beta$	Constante de inhibición de etanol	1.3505	g/L

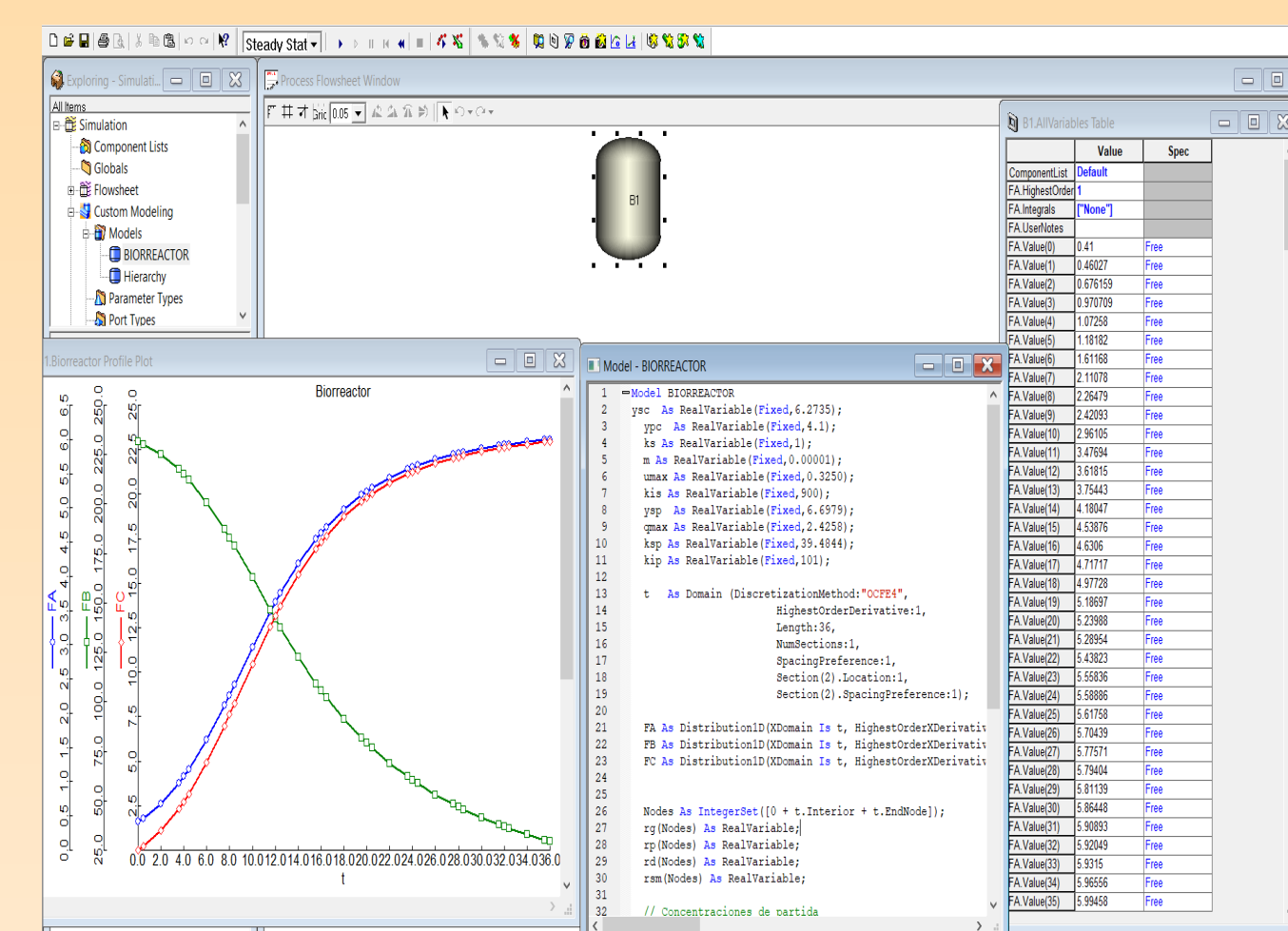


Figura 2. El tablero ACM del modelo del Biorreactor para fermentación de mucilago de cacao CCN-51.

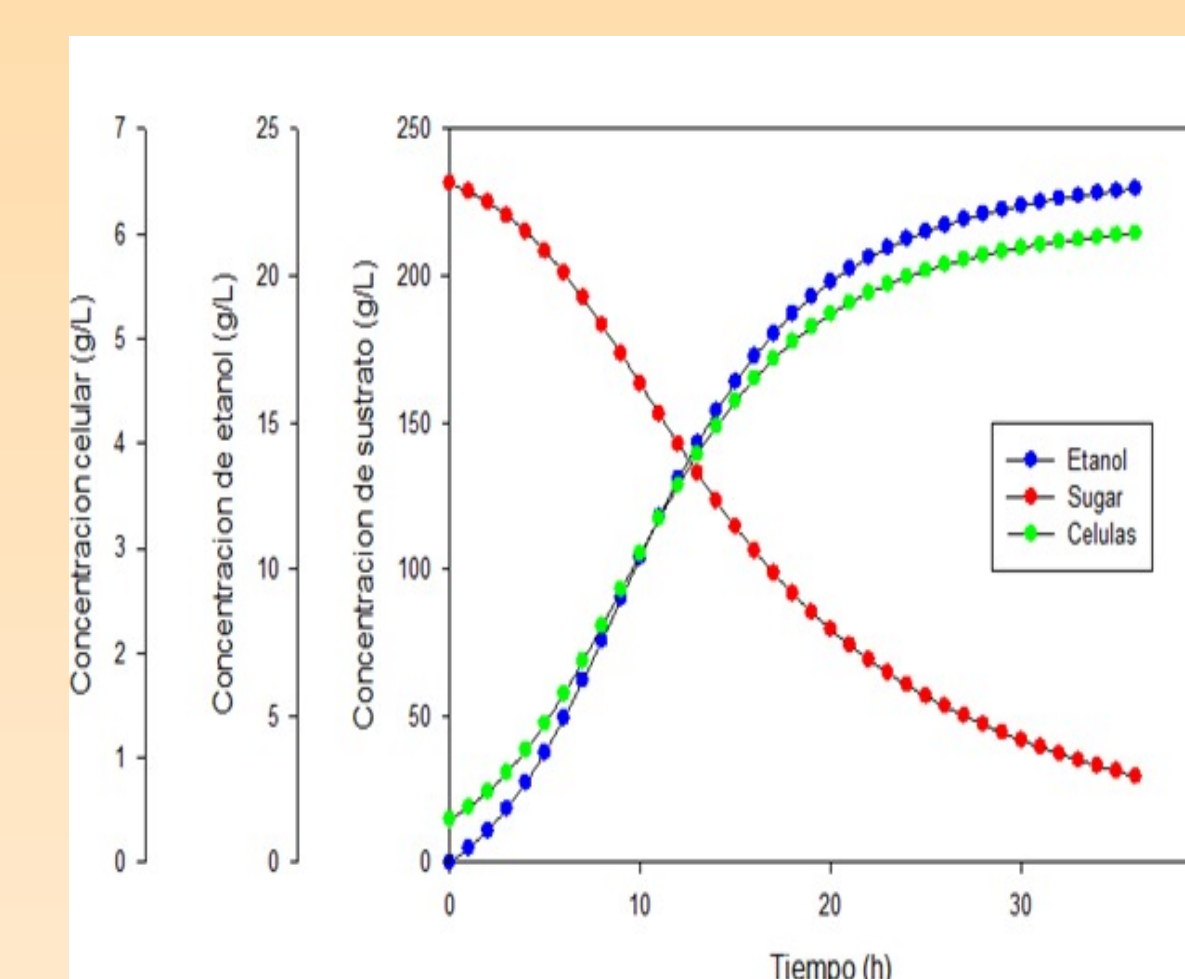


Figura 3. Crecimiento de biomasa, consumo de glucosa y producción de bioetanol en la fermentación de mucilago de cacao CCN-51.

## CONCLUSIONES

El mucilago de cacao CCN-51, residuo de la creciente industria cacaotera, representa una materia prima con un gran potencial para la obtención de bioetanol, puesto que contienen azúcares fermentables y se encuentra de manera abundante en el Ecuador.

Este estudio utilizó el modelo *cinético de Andrew y Levenspiel* y se modeló con Aspen Custom Modeler, mostrando un buen ajuste con los datos experimentales obtenidos, incluye términos de inhibición por el consumo de sustrato, los términos de inhibición del producto y presentan aceptabilidad para predecir y controlar sistemas fermentativos con mucilago de cacao CCN-51.

## Referencias

- PHUKOETPHIM, N., SALAKKAM, A., LAOPAIBOON, P. and LAOPAIBOON, L. 2017. Kinetic models for batch ethanol production from sweet sorghum juice under normal and high gravity fermentations: Logistic and modified Gompertz models. *Journal of Biotechnology*, Thailand, 243, 69–75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbt.2016.06.023>.
- ARIYAJAROENWONG, P., LAOPAIBOON, P., and SALAKKAM, A. 2016. Kinetic models for batch and continuous ethanol fermentation from sweet sorghum juice by yeast immobilized on sweet sorghum stalks. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Thailand, 66, 210–216. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbt.2016.12.012>
- SÁNCHEZ Ó. and CARDONA C. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresour Technology* [en línea]. 2008, (99), 5270–5295 [Consulta: Enero 2018]. DOI 10.1016/j.biortech.2007.11.013.
- MELO, E., SÁNCHEZ, Y., FERRER, N., y FERRER, N. Evaluación de un motor de encendido por chispa trabajando con mezclas etanol-gasolina. *Ingeniería Energética* [en línea]. 2012, 33(2), 94–102 [Consulta: enero 2018]. ISSN 1815 – 590.
- VALLEJO, C., y GOYA, M. Obtención de una bebida alcohólica a partir de mucilago de cacao, mediante fermentación anaerobia en diferentes tiempos de inoculación [en línea]. Tesis de pregrado. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, 2013. [Consulta: enero 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uteq.edu.ec/jspui/handle/43000/336>
- KALVATCHEV, Z., GARZARO, D., y GUERRA, F. Theobroma Cacao L.: Un nuevo enfoque para nutrición y salud. *Agroalimentaria* [en línea]. 1998, 4(6), 23–25 [Consulta: Enero 2018]. ISSN-e 1316-0354. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3233588>
- AUGUSTO, J., y MORA, H. Producción de etanol a partir de glicerina por vía fermentativa con *Saccharomyces cerevisiae* y simulación del proceso a escala industrial. Tesis de maestría. Universidad de Manizales, Colombia, 2015.
- DODIĆ, J., VUČUROVIĆ, D., DODIĆ, S., GRAHOVAC, J., POPOV, S., and NEDELJKOVIĆ, N. 2012. Kinetic modelling of batch ethanol production from sugar beet raw juice. *Applied Energy*, Serbia, 99,