

OBTENCIÓN DE PRODUCTOS CON VALOR AGREGADO A PARTIR DE
BANANO DE RECHAZO EN EL CONTEXTO ECUATORIANO

YADIRA ELIZABETH VARGAS GARCÍA

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS Y SISTEMAS INDUSTRIALES
BOGOTÁ
2018

**OBTENCIÓN DE PRODUCTOS CON VALOR AGREGADO A PARTIR DE
BANANO DE RECHAZO EN EL CONTEXTO ECUATORIANO**

Autora:

YADIRA ELIZABETH VARGAS GARCÍA

Tesis de grado para optar al título de:

Master en Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales

Director:

Javier Dávila Rincón, IQ, M.Sc, Ph.D.

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Asesor:

Javier Naranjo Vasco, IQ, M.Sc, Ph.D.

Universidad Católica de Manizales.

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS Y SISTEMAS INDUSTRIALES
BOGOTÁ

2018

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo dedico a mis queridos padres Tito Vargas Velasteguí y Rosa García Vargas, quienes han sabido guiarme, brindarme consejos, apoyo y amor.

De igual manera a mis hermanos Daniel y Tito que me han brindado su confianza y me han servido como ejemplo de superación. A mi hermanito Kevin, a mi sobrino Jean Pierre y a mis sobrinas Emily y Carolina que con su ternura se han convertido en mi razón de vida.

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a Dios por permitirme culminar una de mis metas, a mis padres Tito Vargas Velasteguí y Rosa García Vargas; a mis hermanos Daniel y Tito; y a Joffre Pazmiño Sánchez por su apoyo incondicional, confianza y amor.

Agradezco a mis padrinos Abigail Cedeño, Cecibel Játiva y Wilson Grandes por su confianza brindada y por haberme permitido cumplir esta meta ya que sin su apoyo no hubiera sido posible lograrlo.

A la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, programa de Maestría en Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales por brindarme una educación de calidad. De una forma muy especial quiero agradecer a mis directores de tesis Javier Dávila Rincón y Javier Naranjo Vasco por sus conocimientos brindados y por sembrar en mí la pasión por la investigación.

Al Instituto de Fomento al Talento Humano de Ecuador (IFTH) por el soporte financiero, al grupo de investigación de Ingeniería Química y ambiental (TEP-233) de la Universidad de Jaén – España por la asistencia técnica para llevar a cabo la caracterización química de la materia prima, al semillero de Investigación Bio-based products and Processes de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano y a la Universidad Católica de Manizales por el apoyo académico.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	11
2.1.	Caracterización química de CB.	12
2.1.1.	Materia prima.	12
2.1.2.	Pretratamiento.....	12
2.1.3.	Contenido de humedad.....	12
2.1.4.	Extractivos.....	13
2.1.5.	Celulosa, hemicelulosa y lignina.	13
2.1.6.	Cenizas	15
2.1.7.	Proteínas.....	15
2.1.8.	Caracterización de la pulpa del banano de rechazo.	15
2.2.	Análisis tecno-económico.....	15
2.2.1.	Simulación del proceso.	15
2.2.2.	Análisis económico.	18
2.3.	Análisis ambiental.....	19
2.4.	Análisis de posibles impactos sociales.....	19
2.4.1.	Generación de empleos directos e indirectos.	19
2.4.2.	Representación del salario neto mensual en la canasta básica familiar.	20
2.4.3.	Equidad de género.....	20
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
3.1.	Caracterización química.	21
3.2.	Análisis tecno-económico.....	22
3.3.	Análisis ambiental.....	25
3.4.	Análisis de posibles impactos sociales.....	26
3.4.1.	Empleos directos e indirectos.	26
3.4.2.	Representación del salario neto mensual en la canasta básica familiar.	26
3.4.3.	Equidad de género.....	27
4.	CONCLUSIONES	27
5.	BIBLIOGRAFÍA	28

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Composición química de la pulpa de banano	15
Tabla 2. Resumen de las condiciones de operación de las unidades de la biorrefinería.....	16
Tabla 3 Costos para análisis económico.	18
Tabla 4 Distancias y tiempos de cada viaje entre bananeras y localización de la biorrefinería.....	20
Tabla 5 Composición química de CB.	21
Tabla 6 Costos de operación de la biorrefinería de banano de rechazo (costos por unidad producida)	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo de proceso de la biorrefinería de banano de rechazo. 16	
Figura 2 Valor presente neto para un proyecto de 30 años.24	
Figura 3 PIA de la biorrefinería.25	

RESUMEN

En Ecuador el banano de rechazo no es aprovechado eficientemente debido a que es desechado al aire libre y presenta problemas ambientales y económicos para los bananeros, sin embargo esta fruta ofrece la oportunidad de obtener bioproductos de valor agregado debido su composición química. El objetivo de esta investigación fue proponer un diseño para la obtención de polihidroxitirato y bioetanol rectificado al 96 % a partir de banano de rechazo para lo cual se realizó la caracterización química de la cáscara del fruto de acuerdo a los estándares establecidos por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables. Además, se analizaron los aspectos tecno-económicos y ambientales utilizando las herramientas computacionales Aspen Plus y WASTE algorithm Reduction, respectivamente. Finalmente se analizaron los posibles impactos sociales mediante un análisis socioeconómico considerando la localización de la biorrefinería. Los resultados tecno-económicos indicaron un costo de producción de 6,70 USD/kg y 5,52 USD/litro para polihidroxitirato y bioetanol, respectivamente. Por otro lado, los resultados del análisis ambiental indicaron que los mayores impactos generados en las dos plantas corresponden a las categorías relacionadas a toxicidad humana por ingestión y potencial de toxicidad terrestre. Los impactos sociales generados por la biorrefinería son positivos ya que brinda la posibilidad de generar 30 empleos directos y mejorar el estatus económico para sus trabajadores.

Palabras clave: Biorrefinería, bioetanol rectificado, polihidroxitirato, impactos sociales, evaluación tecno-económica y ambiental.

ABSTRACT

In Ecuador, rejected bananas are not used efficiently because these are discarded in the open air and present environmental and economic problems for banana growers. However, this fruit offers the opportunity to obtain value-added bioproducts due to its chemical composition. The objective of this research was to propose a design for obtaining polyhydroxybutyrate and neutral extra rectified bioethanol (96 %) from rejected bananas, for which the chemical characterization of the fruit peel was performed according to the standards established by the National Renewable Energy Laboratory. In addition, the technical, economic and environmental aspects were analyzed using the Aspen Plus and WASTE algorithm Reduction computer packages. Finally, the possible social impacts were analyzed through a socioeconomic analysis considering the location of the biorefinery. The techno-economic results indicated a cost of production of 6.71 USD/kg and 5.52 USD/liter for polyhydroxybutyrate and bioethanol respectively. On the other hand, the results of the environmental analysis indicated that the greatest impacts generated in the two plant correspond to the human toxicity potential by inhalation and terrestrial toxicity potential categories. The social impacts generated by the biorefinery are positive since it offers the possibility of generating 30 direct jobs, improving the economic status for its workers and gender equity.

Keywords: Biorefinery, rectified bioethanol, polyhydroxybutyrate, social impacts, techno-economic and environmental evaluation.

1. INTRODUCCIÓN

Ecuador es el principal país exportador mundial de banano, cubre el 30% de la oferta mundial de esta fruta (ProEcuador 2016a). En el año 2016, se produjeron 6,53 millones de toneladas (T), de los cuales 6,34 millones de T de banano fueron vendidas a nivel nacional e internacional, generando 188.060 T de banano de rechazo (INEC 2016c). Este banano rechazado es normalmente desechado al aire libre generando impactos ambientales negativos y pérdidas económicas a los bananeros, las cuales representan aproximadamente el 6% del área plantada (INEC 2015; Moreira Carrión 2013; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014).

Por otro lado, la industria ecuatoriana de plásticos se ha convertido en un importante sector de la economía nacional, sin embargo el 100% de su materia prima es importada, solo en el año 2014 se importaron 450.000 T de resinas. Las resinas de polipropileno, policloruro de vinilo, polietileno de baja y alta densidad, son importados principalmente de China, India, Colombia y Brasil (PROECUADOR 2015). Similarmente, la industria ecuatoriana de alcohol etílico proveniente de caña de azúcar ha tenido un fuerte crecimiento desde el año 2014 debido a la caída de precios del azúcar y a la demanda de etanol anhidro para biocombustible (Evelyn Tapia 2015). Sin embargo la producción nacional no cubre con la demanda de alcohol etílico, por lo que en el año 2016 las importaciones de esta materia prima alcanzaron los 55,9 MMUSD (Millones de dólares) (OEC 2016). De esta manera, se demuestra que Ecuador necesita buscar materias primas renovables como la biomasa, que sean útiles para la producción de este tipo de insumos/materias primas (resinas de plásticos y alcohol etílico), que no contribuyan al cambio climático y aporten al cambio de la matriz productiva y energética del país.

El uso de la biomasa a nivel mundial ha tenido un creciente uso en la última década. Esta ha sido destinada a la producción de bioenergía y biomateriales (Gerssen-Gondelach et al. 2014). Solo en el año 2016, la biomasa ocupó el cuarto lugar en el consumo total energético del mundo, precedido por el carbón, petróleo y gas natural (Wang et al. 2016). Las principales ventajas que tiene el uso de la biomasa son la mejora de la situación socio-económica de las áreas rurales mediante el aprovechamiento de residuos agrícolas y la reducción de emisiones de azufre y partículas de CO, CH₄ y NO_x al medio ambiente. Además la biomasa posee un círculo neutro de CO₂ que no contribuye al efecto invernadero (MEER 2014).

Los bioplásticos son unos de los principales bioproductos que se comercializan dentro de la economía basada en biomasa. Estos biomateriales son fabricados a partir de materias primas renovables y/o biodegradables con una amplia gama de propiedades y aplicaciones (European bioplastics 2016). El polihidroxibutirato (PHB) es el bioplástico, biobasado y biodegradable con un destacado uso a nivel industrial,

el cual se lo puede obtener a partir de fructosa, glucosa xilosa y sucrosa (Saratale and Oh 2015). Sus principales usos son películas de empaquetado en bolsas, contenedores, productos higiénicos, contenedores de cosméticos, envases de shampoo, entre otros (Ahmad et al. 2015; Valero-Valdivieso, Ortegon, and Uscategui 2013). El PHB puede sustituir al polipropileno, poliestireno y polietileno de alta densidad (Naranjo, Cardona, and Higueta 2014).

Por otro lado, la biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol es una alternativa promisoriosa ya que es una materia prima eficiente y rentable (Danmaliki et al. 2016). Este tipo de biomasa se caracteriza por su contenido de carbohidratos, que son considerados componentes claves para la producción de bioetanol (Brooks 2008; Danmaliki et al. 2016). Mediante procesos fermentativos y de destilación se puede obtener bioetanol rectificado al 96% v/v, bioetanol rectificado extra neutro al 96% v/v y/o bioetanol anhídrido al 99,5% v/v, los cuales tienen una alta demanda a nivel de industrias farmacéuticas, alimenticias y de biocombustibles (J. Dávila, Rosenberg, and Cardona 2016; Kongkasawan, Nam, and Capareda 2016; Moreira Carrión 2013).

Finalmente, el banano de rechazo, por sus características amiláceas (pulpa) y lignocelulósicas (cáscara) es una materia prima interesante para obtener bioproductos de valor agregado mediante procesos físicos, químicos y enzimáticos (Danmaliki et al. 2016; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014). En este sentido, con el fin de dar valor agregado a esta biomasa residual, incentivar al desarrollo de nuevas investigaciones para el aprovechamiento del potencial agrícola y generar un aporte al cambio de la matriz productiva del Ecuador, la presente investigación desarrolla la caracterización química de la cáscara de banano (CB), el análisis tecno-económico, ambiental y social a nivel de ingeniería conceptual del proceso de obtención de PHB y bioetanol rectificado extra neutro al 96% (BREN) bajo el concepto de biorrefinería a partir de banano de rechazo en el contexto ecuatoriano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrolló el diseño conceptual de un proceso para la obtención de PHB y BREN a partir de banano de rechazo en el contexto ecuatoriano, para lo cual, considerando las características amiláceas y lignocelulósicas del fruto, se destina la pulpa del banano para producir PHB y la cáscara para la producción de BREN.

En primer lugar se llevó a cabo la caracterización química de la CB para conocer el contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina, extractivos, proteínas, humedad y cenizas, además se realizó una revisión de la literatura con el fin de determinar la caracterización química de la pulpa del banano. La segunda parte describe el análisis tecno-económico, en la cual se realizó la simulación del proceso para

obtener los balances de masa y energía en la producción de PHB y BREN utilizando la herramienta computacional Aspen Plus V9.0 (AspenTech: Cambridge, EEUU). Posteriormente se llevó a cabo el análisis económico usando Aspen Process Economic Analyzer (AspenTech: Cambridge, EEUU) en el cual se determinó los costos de producción del PHB y BREN. La tercera parte corresponde al análisis ambiental, que se lo realizó usando el software WASTE Reduction algorithm (WAR) desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, EEUU). Finalmente, en la cuarta parte se analizan los posibles impactos socio-económicos.

2.1. Caracterización química de CB.

2.1.1. Materia prima.

El banano de rechazo (*Musa acuminata* AAA var. cavendish) fue obtenido de industrias bananeras ubicadas en la ciudad Quevedo (Ecuador). La preparación de las muestras y la caracterización química de CB fue llevada a cabo siguiendo los procedimientos estándar del laboratorio de biomasa del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, EEUU). El pretratamiento de la CB y la determinación de su contenido de humedad se realizaron en el Centro de Investigaciones en Procesos de Ingeniería (CIPI – Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano – Bogotá, Colombia). Por otro lado, las mediciones de extractivos, celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas y cenizas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Química (Universidad de Jaén – Campus Lagunillas, España). Todas las mediciones fueron realizadas por triplicado.

2.1.2. Pretratamiento

La CB fue secada en un horno analógico (Mermert 854 Schwabach, Alemania) a 50°C durante 68 horas para remover el exceso de agua hasta obtener peso constante. Luego la CB fue molida en un molino de martillos (Retsch SK 100/C, Haan, Alemania). Esta masa molida fue tamizada por 15 minutos en un tamizador portátil (Model RX-24, CETyler, EEUU) a través de tamices de apertura estándar de 150-850 µm, correspondientes a tamices de malla estándar 20-100 (ASTM E-11, Controls, Milano – Italia) (Bonnie Hames et al. 2004). La CB molida y tamizada fue almacenada a -13,8°C hasta su caracterización.

2.1.3. Contenido de humedad.

Se utilizó un Analizador halogenado de humedad (Mettler Toledo, HB43-S, Classic plus, Suiza). Este equipo determinó el peso de la muestra y la secó con su unidad de calentamiento halogenada hasta que el contenido de agua se evaporó (Mettler-Toledo 2011). El contenido de humedad fue calculado de acuerdo a la ecuación (1) (Mettler-Toledo 2011; A Sluiter et al. 2008).

$$\text{Contenido de humedad} = - \frac{\text{peso en humedo} - \text{peso en seco}}{\text{peso en humedo}} \times 100\% \quad (1)$$

2.1.4. Extractivos.

El método usado para determinar los materiales solubles y no estructurales de las muestras acondicionadas (4 a 8 g de CB) involucró dos extracciones para remover los materiales solubles en agua y etanol (Amie Sluiter, Ruiz, et al. 2008). Estas extracciones fueron realizadas usando una unidad soxhlet bajo reflujo por 24 horas. En un matraz de fondo redondo de 250 ml, previamente pesado, se añadieron 160 y 180 ml de agua y etanol al 95% para la extracción acuosa y etanólica respectivamente. El cartucho de celulosa con cada muestra, fue recuperado y puesto en un horno digital (Mermert 854 Schwabach, Alemania) a 60°C durante 48 horas. Los extractivos acuosos y etanólicos fueron calculados de acuerdo a las ecuaciones (2) y (3) respectivamente (Amie Sluiter, Ruiz, et al. 2008).

$$\text{Porcentaje de extractivos acuosos (EA)} = \frac{\text{Masa final de extracción acuosa}}{\text{Masa inicial para extracción}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Porcentaje de extractivos etanólicos (EE)} = \frac{\text{Masa final de extracción etanólica}}{\text{Masa inicial para extracción}} \times 100\% \quad (3)$$

El contenido total de extractivos de CB fue calculado de acuerdo a la ecuación 4.

$$\text{Porcentaje total de extractivos (ET)} = \%EA + \%EE \quad (4)$$

2.1.5. Celulosa, hemicelulosa y lignina.

De las muestras libres de extractivos se tomaron 0.3 g que fueron puestas en tubos de ensayo. Luego 3 ml de ácido sulfúrico (72% p/p) fueron añadidos a las muestras mientras eran mezcladas con una varilla de agitación por 1 minuto para asegurar una hidrólisis uniforme. Después los tubos de ensayo fueron puestas en un baño de agua a 30,5°C por 1 hora y fueron agitados cada 15 minutos. La mezcla resultante fue diluida con 84 ml de agua destilada usando botellas ISO de 250 ml y puestas en autoclave (Raypa, Series AES, España) por 1 hora a 121°C. La solución hidrolizada fue filtrada y 5 ml fueron recuperados dentro de un tubo de ensayo para determinar la lignina ácido soluble y azúcares estándar (glucosa, xilosa, galactosa, arabinosa y manosa) (A Sluiter et al. 2012).

Todas las muestras fueron neutralizadas para analizar los azúcares estándar en el sistema HPLC (High performance liquid chromatography) (Waters, Milford, EEUU) que está equipado con un detector de índice de refracción (Modelo 2414). El contenido de celulosa y hemicelulosa fue obtenido usando la composición de

azúcares estructurales determinado en el HPLC de acuerdo a las ecuaciones 5 y 6 respectivamente, donde MM corresponde a la masa molecular de cada azúcar (A Sluiter et al. 2012).

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{\text{MM celulosa}}{\text{MM glucosa}} \% \text{Glucosa} + \frac{\text{MM celulosa}}{\text{MM galactosa}} \% \text{Galactosa} + \frac{\text{MM celulosa}}{\text{MM manosa}} \% \text{Manosa} \quad (5)$$

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \frac{\text{MM hemicelulosa}}{\text{MM xilosa}} \% \text{Xilosa} + \frac{\text{MM hemicelulosa}}{\text{MM arabinosa}} \% \text{Arabinosa} \quad (6)$$

Luego, la lignina ácido soluble (LAS) fue determinada usando un espectrofotómetro UV-visible a 205 nm (Biochrom, Libra, Reino Unido). Se diluyeron 200 µl de las alícuotas en 4,8 ml de ácido sulfúrico (4% p/p) para obtener un rango de absorbancia de 0,2 – 0,7 utilizando el mismo solvente como blanco (ácido sulfúrico al 4%). El contenido de LAS fue calculado de acuerdo a la ecuación 7 (A Sluiter et al. 2012).

$$\% \text{ LAS} = \frac{\text{Absorbancia} \times \text{df} \times \text{volumen del líquido hidrolizado}}{\text{Longitud de trayectoria UV} \times \text{coeficiente de extinción} \times \text{DMFES}} \quad (7)$$

Dónde: Absorbancia: 205 nm; df es el factor de dilución; volumen del líquido hidrolizado es 86,73 ml; la longitud de la trayectoria UV es en cm; coeficiente de extinción es 110 l/g-cm y DMFES es la masa de la muestra libre de extractivos.

Luego del procedimiento del autoclave, la materia solida de cada muestra de CB fue retenida en un filtro, esta fue utilizada para determinar el porcentaje de lignina ácido insoluble (LAI). La materia sólida fue secada a 105°C hasta obtener peso constante y luego fue puesta en un horno mufla a 575°C hasta peso constante. Los contenidos de LAI y del residuo ácido insoluble (RAI) fueron calculados de acuerdo a las ecuaciones 8 y 9 respectivamente (A Sluiter et al. 2012).

$$\% \text{ LAI} = \frac{\text{Masa del residuo ácido insoluble en base seca} - \text{masa de las cenizas}}{\text{Masa de las muestras originales libre de extractivos}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\% \text{ RAI} = \frac{\text{Masa del residuo ácido insoluble en base seca}}{\text{Masa de las muestras originales libre de extractivos}} \times 100\% \quad (9)$$

Finalmente el contenido total de lignina de las muestras libres de extractivos y de las muestras originales se calculó de acuerdo a las ecuaciones 10 y 11 respectivamente.

$$\% \text{ Lignina (muestra libre de extractivos)} = \% \text{ LAI} + \% \text{ LAS} \quad (10)$$

$$\% \text{ Lignina} = \% \text{ Lignina (muestra libre de extractivos)} \times \frac{100 - \% \text{ ET}}{100} \quad (11)$$

2.1.6. Cenizas

Se ubicó 1g de CB en un crisol previamente pesado. La muestra fue puesta en un horno digital (Mermert 854 Schwabach, Alemania) a 103°C por 24 horas. Luego el crisol fue removido del horno y puesto en un desecador para enfriarlo durante 30 minutos. Más tarde, el crisol con la muestra fueron puestos en una mufla digital (Nabertherm, B 150, Alemania) a 575°C por 3,5 horas y luego fueron puestos nuevamente en un desecador para enfriarlos y pesarlos. Para conocer el contenido de cenizas se utilizó la ecuación 12 (Amie Sluiter, Hames, et al. 2008).

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Masa (crisol+ceniza)} - \text{Masa del crisol}}{1 \text{ g de muestra}} \times 100\% \quad (12)$$

2.1.7. Proteínas

Para esta medición, el porcentaje de nitrógeno elemental fue medido utilizando un equipo analizador de nitrógeno elemental y luego se multiplicó por un factor de nitrógeno (6,25 recomendado por NREL) para obtener el porcentaje de proteínas como se indica en la ecuación 13 (B Hames, Scarlata, and Sluiter 2008).

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ Nitrógeno} \times \text{Factor de nitrógeno} \quad (13)$$

2.1.8. Caracterización de la pulpa del banano de rechazo.

La caracterización química del material amiláceo del banano seleccionada fue determinada por (Duque Quinaya 2014) que corresponde a la caracterización de la pulpa de banano colombiano como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Composición química de la pulpa de banano

Componente	Porcentaje
Celulosa	0,80
Almidón	18,40
Grasa	0,62
Azúcares	2,1
Agua	74,45
Proteína	3,10
Ceniza	0,53

2.2. Análisis tecno-económico.

2.2.1. Simulación del proceso.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de proceso propuesto para la biorrefinería de banano de rechazo para obtener PHB y BREN. El flujo de entrada de materia prima fue de 2679 kg/h y 2021 kg/h de pulpa de banano y cáscara de banano respectivamente, que corresponde al 20% de la oferta nacional de banano

de rechazado (INEC 2016c). La biorrefinería operará 8000 h/año y se usaron los modelos termodinámicos NRTL (Non-Random Two Liquid) para fase líquida y HOC (Hayden-O'Connell) para la fase de vapor para calcular las propiedades de los compuestos involucrados en la simulación (J. A. Dávila et al. 2017)(Naranjo, Cardona, and Higuera 2014). El objetivo y las condiciones de operación de las principales unidades de la biorrefinería en la simulación se resumen en la tabla 2.

Figura 1 Diagrama de flujo de proceso de la biorrefinería de banano de rechazo.

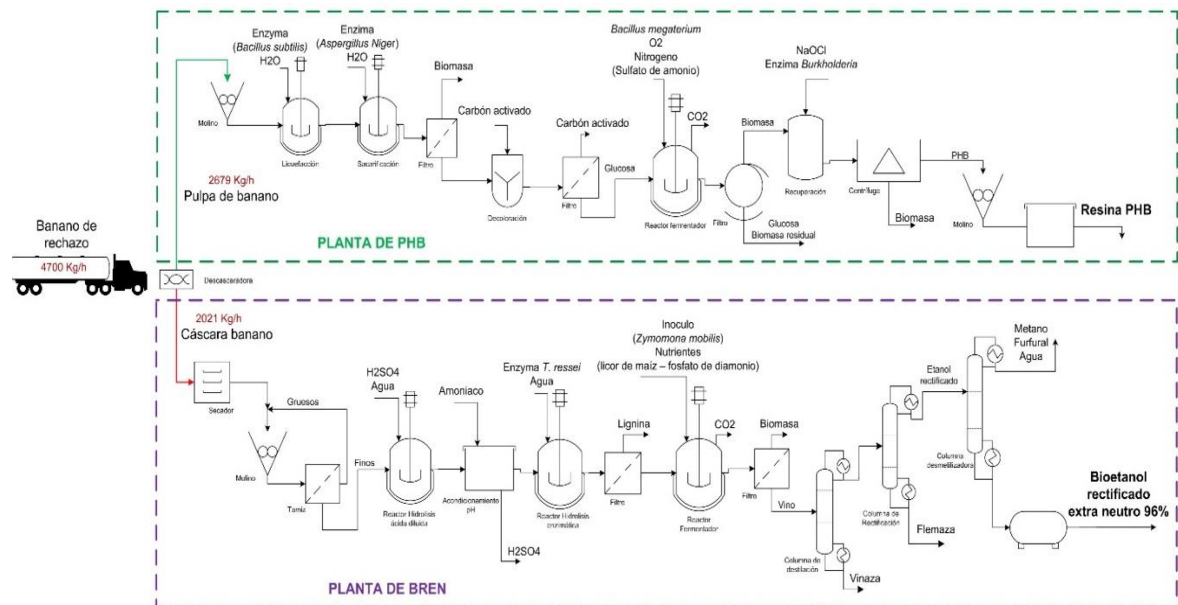


Tabla 2. Resumen de las condiciones de operación de las unidades de la biorrefinería.

Proceso	Unidad	Condiciones y especificaciones	Referencias
PLANTA BREN			
Acondicionamiento	Secador	105°C, 1 bar	(A Sluiter et al. 2008)
	Molino	1 bar, reducir tamaño a 0,45 mm	(J. Dávila, Rosenberg, and Cardona 2016; Quintero, Moncada, and Cardona 2013)
Hidrólisis ácida	Reactor	H_2SO_4 (18mg/g biomasa seca). 158°C, 5,572 bar. Celulosa + H_2O = glucosa ($c^* = 9,9\%$) Celulosa = HMF + 2 H_2O ($c = 0,3\%$) Hemicelulosa + H_2O = xilosa ($c = 90\%$) Hemicelulosa = Furfural + s H_2O ($c = 5\%$)	(Humbird et al. 2011)
	Evaporación flash	130°C, 2,634 bar.	(Humbird et al. 2011)

Neutralización	Tanque de acondicionamiento	Amoniaco (4,8g/l de hidrolizado) 75°C, 4,356 bar	(Humbird et al. 2011)
Hidrolisis enzimática	Reactor	Celulasa <i>T ressei</i> (20 mg/ g celulosa) 48°C, 5,167 bar Celulosa + H ₂ O = 2 Glucosa (c = 100%)	(Humbird et al. 2011)
Fermentación	Reactor	Nutrientes: licor de maíz fermentado, fosfato de diamonio. <i>Zymomona mobilis</i> 32°C, 1 bar Glucosa = 2 Etanol + 2 CO ₂ (c = 95%) 3 Xilosa = 5 etanol + 5 CO ₂ (c = 85%) Glucosa + 2 CO ₂ = 2 Ácido succínico + O ₂ (c = 0,6%) 3 Xilosa + 5 CO ₂ = 5 Ácido succínico + 2,5O ₂ (c = 0,9%)	(Humbird et al. 2011; Moncada, Tamayo, and Cardona 2014)
Destilación (columnas)	Destilación	17 platos, proporción de reflujo = 0,4	
	Rectificación	50 platos, proporción de reflujo = 5	
	Desmetelización	43 platos, proporción de reflujo = 3	
PLANTA PHB			
Acondicionamiento	Molino	25°C, 1 bar. Reducir el tamaño a 0,5 mm	(Zhang et al. 2005)
Hidrolisis	Licuefacción	Enzima <i>Bacillus subtilis</i> (1 kg de enzima/1 T almidón) Almidón + H ₂ O = dextrina (c = 90%) 90°C, 1 bar	(Beishizen 1988; Castellanos Domínguez et al. 2004; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014; Rusendi 1994; Zhang et al. 2005)
	Sacarificación	Enzima <i>Aspergillus niger</i> (0,5 kg de enzima/1 ton de almidón) Dextrina + H ₂ O = glucosa (c = 90%) 60°C, 1 bar	(Arumugam and Manikandan 2011; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014; Rusendi 1994)
Decoloración	Tanque de decoloración	Carbón activado (1% p/v en relación al hidrolizado) 60°C, 1 bar	(Beishizen 1988; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014)
Fermentación	Reactor	Fuente de nitrogeno (NH ₄) ₂ (SO ₄) (1 g/l de glucosa) <i>Bacillus megaterium</i> , rendimiento 22%. 33°C, 1 bar	(Moncada, El-Halwagi, and Cardona 2013; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014)
Separación	Digestión enzimática + química	Enzima <i>Burkholderia</i> sp. PTU9 (2% en peso) NaOCl (30% p/p) Recuperación de 95% del PHB	(Fernández-Dacosta et al. 2015; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014; Posada et al. 2011)
	Centrífuga	30°C, 1 bar	(Fernández-Dacosta et al. 2015; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014)
Pulverización	Molino	30°C, 1 bar. Resina de PHB	(Fernández-Dacosta et al. 2015)

*C= conversión

2.2.2. Análisis económico.

El análisis económico se desarrolló en base a los balances de masa y energía obtenidos en la simulación del proceso con el fin de determinar los costos de producción del PHB y BREN. El costo de producción considera los costos de operación de la biorrefinería y la cantidad de producto generado por periodo (8000 horas). Para determinar los costos de operación se consideran los costos de la materia prima, insumos, servicios básicos/utilidades (agua, electricidad, vapor), labor/mano de obra (3 turnos de 8 horas), mantenimiento, depreciación (método de suma de dígitos), costos generales de planta, costos generales y administrativos y cargos operacionales. Para los parámetros de diseño, tiempo de construcción y puesta en marcha de la biorrefinería, se determinaron 12, 24 y 5 meses respectivamente, como lo recomienda (Davis et al. 2015; Humbird et al. 2011). Adicionalmente, se requieren parámetros tarifarios (impuestos) dentro del contexto ecuatoriano como se indica en la tabla 3 junto con los parámetros de costos mencionados anteriormente.

Se consideraron factores de escalamiento del 5% para productos y capital de proyecto, 3,5% para materias primas e insumos y 3% para mantenimiento, mano de obra y utilidades. Adicionalmente se determinaron 30 años como tiempo de vida útil del proyecto, con el fin de evaluar la rentabilidad de la biorrefinería mediante el análisis del Valor Presente Neto (VPN), ya que este parámetro indica los beneficios a obtenerse durante el tiempo de vida del proyecto.

Tabla 3 Costos para análisis económico.

Parámetro	Denominación	Valor	Unidad	Referencia
Costos materias primas ^a	Cáscara de banano*	0,09	USD/Kg	Empresa Oro banana y Ecuagreen prodex
	Pulpa de banano*	0,12	USD/Kg	
Costos Insumos ^a	H2SO4	0,09	USD/ Kg	(J. A. Dávila et al. 2017; García et al. 2017)
	Amoniaco	0,20	USD/ Kg	(Akiyama, Tsuge, and Doi 2003)
	Enzimas	3,01	USD/ Kg	(Alibaba 2017)
	Licor de maíz	0,07	USD/ Kg	(Davis et al. 2015)
	Fosfato de diamonio	0,36	USD/ Kg	(IndexMundi 2017)
	Carbón activado	2,74	USD/ Kg	Empresa Carbotecnia S.A.
	(NH ₄) ₂ (SO ₄)	0,12	USD/ Kg	(Alibaba 2017)
Costos mano de obra	NaOCl	0,10	USD/ Kg	(Akiyama, Tsuge, and Doi 2003)
	Operario	3,11	USD/h	(Ministerio del trabajo 2017)
	Supervisor	3,91	USD/h	(Ministerio del trabajo 2017)
Costos servicios básicos/utilidades	Electricidad	1,19	USD/Kwh	Promedio de precios de Ecuador
	Agua potable	0,008	USD/galón	
	Combustible (GLP)	7,636	USD/MMBTU	
Impuestos	Impuestos	34,00	%/año	(SRI 2017)
	Tasa de interés	7,202	%/año	(BCE 2017)

* calculado en base al costo de 1 caja de 18,14 kg de banano de rechazo en el mercado ecuatoriano. , ^a Los costos de las materias primas e insumos incluyen el costo de transporte por una distancia de 200 Km.

2.3. Análisis ambiental

Los impactos ambientales se calcularon de acuerdo al balance de masa y energía obtenido en la simulación del proceso. Las categorías de impactos analizados son: toxicidad humana por ingestión (HTPI), toxicidad humana por exposición dérmica o inhalación (HTPE), potencial de toxicidad terrestre (TTP), potencial de toxicidad acuática (ATP), potencial de calentamiento global (GWP), potencial de agotamiento de ozono (ODP), potencial de oxidación fotoquímica (PCOP) y potencial de acidificación o lluvia ácida (AP). Estos impactos se suman para obtener los potenciales impactos ambientales totales (PIA) por kg de producto (Cabezas, Bare, and Mallick 1999; Young and Cabezas 1999). Los límites de este análisis corresponden a los procesamientos de la biorrefinería, es decir puerta a puerta y el GLP (Gas licuado de petróleo) fue utilizado como combustible para cubrir los requerimientos de vapor dentro de la biorrefinería.

2.4. Análisis de posibles impactos sociales

Existe una amplia gama de posibles impactos sociales, tanto negativos como positivos, que se pueden generar por la instalación de una nueva biorrefinería, sin embargo por el contexto y alcance de esta investigación se analizarán impactos socio-económicos tales como a) generación de empleos directos e indirectos, b) representación del salario neto mensual en la canasta básica familiar y c) equidad de género, como lo recomiendan y analizan (Budzianowski and Postawa 2016; Gnansounou et al. 2017; Romijn et al. 2014).

Para analizar los impactos a y b, es necesario determinar la localización de la biorrefinería, por lo que se asume que estaría ubicada en la ciudad de Machala, Provincia del Oro porque en esta provincia se concentra el 41% de la producción nacional de banano (ProEcuador 2016b), además, dentro del contexto de biorrefinerías se aconseja que la instalación este cerca de las materias primas (Humbird et al. 2011). Además, cabe recalcar que la instalación de una biorrefinería genera desarrollo económico, social y ambiental tanto en zonas urbanas como rurales (McGuire et al. 2017; Moncada B., Aristizábal M., and Cardona A. 2016)

2.4.1. Generación de empleos directos e indirectos.

La cantidad de empleos directos se determina mediante la cantidad mínima de operarios y supervisores que necesita la biorrefinería según el análisis económico desarrollado en Aspen Process Economic Analyzer, con el objetivo de contrarrestar el 4,4% de la tasa de desempleo en la ciudad de Machala reportado hasta septiembre de 2017 (INEC 2017b).

Con respecto a la cantidad de empleos indirectos, esta fue determinada con la cantidad de choferes necesarios para asegurar la entrega de banano de rechazo, considerando que la jornada laboral de 1 chofer son 8 horas diarias en las que incluye el tiempo de conducción y pausas por carga y descarga (Ministerio del trabajo 2015). En la tabla 4 se indica tiempos por recorrido (h) entre las bananeras y la localización de la biorrefinería (Ciudad de Machala). Las bananeras seleccionadas corresponden a las de mayor producción a nivel nacional (MAGAP 2017) y de todas las bananeras se obtienen las 112,8 T/día de banano de rechazo requeridas.

Tabla 4 Distancias y tiempos de cada viaje entre bananeras y localización de la biorrefinería

Proveedores		Localización biorrefinería
Bananeras	Localización (Provincia)	h
Exbafruc Cía. Ltda.	El Oro	0,08
CEINCONSA	El Oro	0,32
Agraind S.A.	Los Ríos	3,82
Agzulada.	Los Ríos	5,03
Ecuagreen.	Guayas	2,73
Asociación de pequeños productores El guabo	El Oro	0,35

2.4.2. Representación del salario neto mensual en la canasta básica familiar.

El costo de la canasta básica familiar para el mes de octubre del 2017 en las provincias de El Oro fue de 683,52 USD (INEC 2017a). Este valor está calculado para un hogar de 4 miembros y con 1,6 perceptores que ganan la remuneración básica unificada (437,5 USD/mes) (INEC 2017a). El análisis de este impacto se realizará mediante la diferencia entre el salario neto mensual y el costo de canasta básica familiar (de la provincia seleccionada como localización de la biorrefinería) considerando 2 escenarios, el primero, el trabajador sea sostén de familia y el segundo, que el trabajador comparta los gastos con una persona que gane la remuneración básica unificada.

2.4.3. Equidad de género.

Para este impacto social se determinó la cantidad de mujeres que trabajarían en la biorrefinería y el cargo que ocuparían considerando las características físicas de una mujer, con el fin de establecer en este nivel conceptual, la oportunidad del género femenino en desempeñarse laboralmente en este tipo de bioindustrias.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización química.

El resultado del contenido de humedad de CB fue de 87,20% \pm 0,02. Este contenido es similar a los reportados por bananos de rechazo en Colombia, con rangos de humedad de 87,1% a 89,10% (Naranjo, Cardona, and Higuita 2014; Velásquez Arredondo, Ruiz Colorado, and De Oliveira 2010). A pesar de que el contenido de humedad es similar a los reportados en la literatura, las variaciones dependen fuertemente de varios factores tales como la variedad de la planta, propiedades del suelo y del sistema de cultivo (Akintayo 2004). Como era de esperarse, el contenido de humedad de CB es alto, como ocurre en muchas frutas, sin embargo esto puede representar un alto consumo energético en los procesos implicados para su procesamiento (López et al. 2014). La tabla 5 indica la composición química de CB en base seca.

Tabla 5 Composición química de CB.

Componente	Promedio	Desviación estándar
Extractivos	53,30	1,84
Celulosa	15,46	0,46
Hemicelulosa	4,33	0,07
Lignina	14,78	0,85
Cenizas	3,41	0,01
Proteína	8,72	0,13

Con respecto al contenido de extractivos, otros autores reportan contenidos en pseudotallos y raquis de fruto de 9,7% y 6% respectivamente (Abdullah et al. 2014). Otras cáscaras de frutas con altos valores de extractivos fueron reportados en la literatura, en los que se incluye la cáscara de naranja con 38,99% (Piedrahita Hernández 2015), y la cáscara del aguacate con 34,38% de extractivos (J. A. Dávila et al. 2017). Los principales extractivos que tiene CB son: esteroides, ácidos grasos y alcoholes alifáticos que pueden usados para aplicaciones neutraceuticas, como reducir la absorción de colesterol en la sangre (Villaverde et al. 2013). Como se explicó anteriormente, otros factores como la estación y prácticas de cultivo pueden ser de importancia relevante en la composición del banano incluyendo sus extractivos.

El contenido de celulosa de CB fue cercana al 13,2% y más alta que 8,4%, valores reportados anteriormente (Mohapatra, Mishra, and Sutar 2010; Velásquez Arredondo, Ruiz Colorado, and De Oliveira 2010). De la celulosa se puede obtener glucosa (J. A. Dávila, Rosenberg, and Cardona 2017), la cual es una plataforma para obtener productos con valor agregado tales como etanol (Moreira Carrión 2013), bioplásticos basados en celulosa y PHA's (polihidroxicanoatos) en los que se incluye el PHB (Álvarez-chávez et al. 2012).

El contenido de hemicelulosa fue de 4,33%, el cual fue similar a 4,6% del tallo floral del banano (Mohapatra, Mishra, and Sutar 2010), pero más bajo que 8,4%, 14,8% y 23,03% reportados de cáscaras de banano (Happi Emaga et al. 2008; López et al. 2014; Velásquez Arredondo, Ruiz Colorado, and De Oliveira 2010). Del contenido de hemicelulosa se puede obtener también xilitol (J. A. Dávila, Rosenberg, and Cardona 2017), etanol (Mohapatra, Mishra, and Sutar 2010) y ácido láctico (Bioenarea 2013).

El contenido de lignina fue similar al 14% y cercano al 12,1% reportado en la literatura (Happi Emaga et al. 2008; Velásquez Arredondo, Ruiz Colorado, and De Oliveira 2010). El contenido de lignina es una oportunidad para obtener combustibles sólidos (Bioenarea 2013; Mohapatra, Mishra, and Sutar 2010) y un número de productos de valor añadido como pesticidas, dispersantes, yeso, limpiadores industriales, adhesivos, entre otros (Moncada 2012).

El porcentaje de cenizas de CB fue bajo en comparación al 5,8%, 9,4% y al 11,37% reportados anteriormente en la literatura (Afanador 2006; Monsalve G., Medina de Perez, and Ruiz Colorado 2006; Velásquez Arredondo, Ruiz Colorado, and De Oliveira 2010). Por otro lado el contenido de proteínas de CB (8,72%) indica que fue un 3% más alto en comparación con un estudio reportado en Colombia que indicó el 5,87% (Afanador 2006).

3.2. Análisis tecno-económico

De acuerdo al balance de materia, se obtuvo una producción de 1446,32 kg/h de PHB y 119,24 l/h de BREN. En este análisis tecno-económico se puede determinar que la mayor producción de PHB se debe a las características amiláceas de la pulpa, ya que contiene altos niveles de azúcares y almidón (Duque Quinaya 2014) que permiten tener un buen rendimiento de glucosa en sus procesos de hidrolizado (Naranjo, Cardona, and Higueta 2014).

Las corrientes de salida tales como lignina, glucosa residual, CO₂ y vinaza tienen un alto potencial para otras aplicaciones. La lignina puede ser utilizada para obtener combustibles sólidos (Mohapatra, Mishra, and Sutar 2010), pesticidas,

dispersantes, entre otros (Moncada 2012). El CO₂ puede capturarse y mediante procesos de purificación se lo puede destinar como materia prima para la industria alimenticia y como sustrato para crecimiento de micro algas (Moncada, Cardona, and Rincón 2015). Si se utilizan estas corrientes de salida (realizando su respectivo proceso de purificación) mediante integración másica, la biorrefinería tendría una mayor oferta de bioproductos y cubriría más áreas o nichos de mercado aplicando el concepto de bioeconomía circular (European Commission 2017).

Con respecto al análisis económico, en la tabla 6 se muestra el total de los costos de operación de la planta de PHB y BREN por unidad producida. Los resultados indicaron que para la planta de PHB, los materiales/insumos representan el 84,14% de costos de operación, esto se debe a la gran cantidad de enzimas requeridas dentro del proceso (61,81 MMUSD/periodo), a su vez, esto demuestra la necesidad de desarrollo de trabajos de investigación en los cuales se sinteticen enzimas con mayor productividad y menores costos. Los altos costos de los materiales/insumos para el PHB son similares a los reportados por (Choi and Lee 1997) que representaron el mayor porcentaje en sus costo de operación.

Tabla 6 Costos de operación de la biorrefinería de banano de rechazo (costos por unidad producida)

Costo	Planta PHB		Planta BREN	
	USD/Kg	Porcentaje	USD / Litro	Porcentaje
Materias primas	0,24	3,59	1,72	31,12
Materiales/insumos	5,65	84,14	1,14	20,61
Servicios básicos/Utilidades	0,26	3,87	1,26	22,86
Mano de obra	0,01	0,15	0,15	2,67
Mantenimiento	0,01	0,17	0,17	3,15
Costos operacionales	0,002	0,04	0,04	0,67
Costos generales de planta	0,01	0,16	0,16	2,91
Costos generales y administrativos	0,49	7,37	0,37	6,72
Depreciación	0,03	0,51	0,51	9,29
COSTO TOTAL	6,70	100	5,52	100

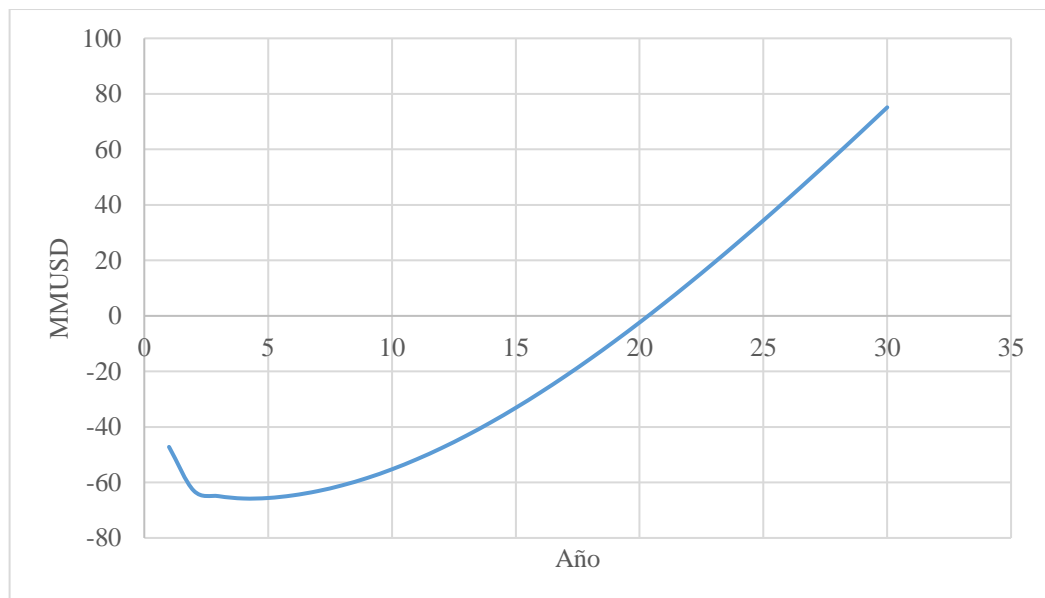
Con respecto a la planta de BREN, la materia prima (cáscara de banano) representa el 31,12 % en comparación al 20,61% de materiales/insumos necesarios, esto se debe a que se requiere mayor cantidad de cáscara de banano para producir una cantidad mínima de BREN (90 Kg/h). Adicionalmente, en esta planta se requiere mayor cantidad de servicios básicos/utilidades en comparación a la planta de PHB, este requerimiento es similar a lo reportado por (J. Dávila, Rosenberg, and Cardona

2016; Naranjo, Cardona, and Higueta 2014). La mayor necesidad de utilidades demuestra que una integración energética sería una buena estrategia con el fin de reducir los costos de operación (J. Dávila, Rosenberg, and Cardona 2016).

Considerando los costos de operación y las cantidades producidas de PHB y BREN se obtuvo un costo de producción de 6,70 USD/kg y 5,52 USD/litro, respectivamente. Estos costos superan a los precios de venta de 6,50 USG/kg de PHB (Biocycle 2017) y 1,20 USD/litro de BREN (Codana 2017). El costo de producción de BREN se podría reducir si se realiza generación de energía eléctrica en su propia planta a partir del solido remanente rico en lignina (Quintero, Moncada, and Cardona 2013). Por otro lado, se puede reducir los costos de la materia prima al minimizar la distancia de los viajes de recolección del banano de rechazo, por lo que se requeriría optimizar la localización de la biorrefinería (Kaboli et al. 2007; Tavakkoli-Moghadam and Mousavi 2011).

A pesar de los altos costos de producción de PHB y BREN, el análisis de VPN (figura 2) indica una recuperación de la inversión al año 21, con una tasa interna de retorno del 13,77%. Esto se debe a que cada año los precios de los productos tienen un factor de escalamiento del 5% en comparación al 3,5% correspondiente a materias primas e insumos, permitiendo de esta manera, en el año 21 alcanzar un costo de producción menor al precio de venta analizado.

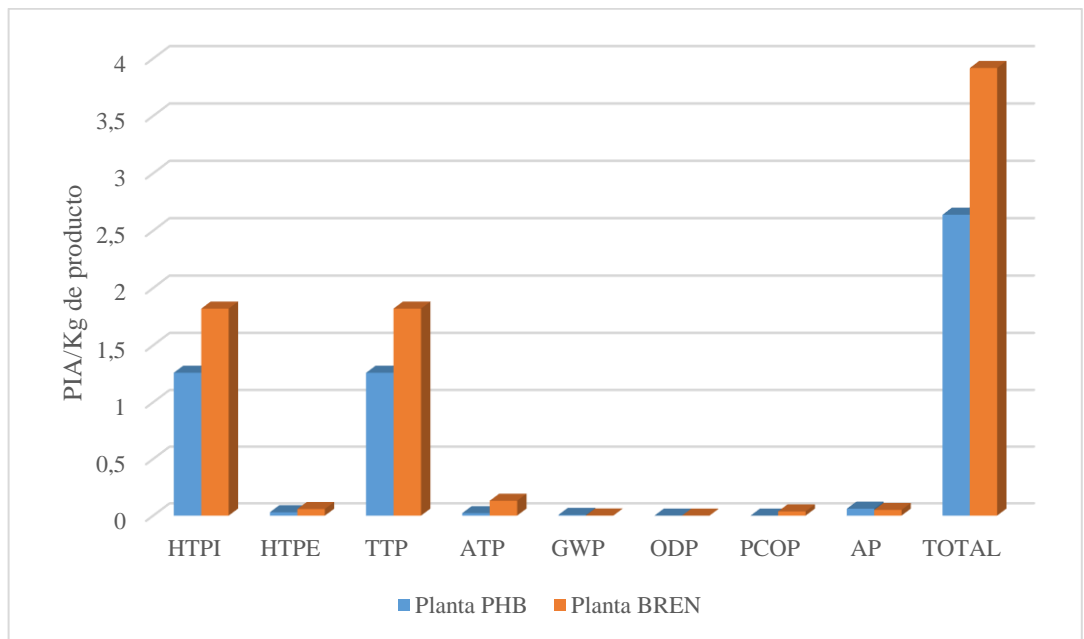
Figura 2 Valor presente neto para un proyecto de 30 años.



3.3. Análisis ambiental.

El análisis ambiental fue desarrollado para cada planta de la biorrefinería. La figura 3 indica los posibles impactos ambientales en la producción de BREN y PHB, a su vez demuestra que al producir BREN se generan mayores impactos ambientales, esto se debe a las altas cargas de emisiones en las corrientes de salida tales como H_2SO_4 , CO_2 , amoníaco, vinazas, flemazas y metanol. Para las dos plantas, las categorías HTPI y TTP son los que presentan mayor impacto ambiental debido a que las corrientes de salida de las plantas son en su mayoría corrientes líquidas y sólidas y tienen una alta probabilidad de ser ingeridas (Young and Cabezas 1999).

Figura 3 PIA de la biorrefinería.



Estos resultados corroboran que se debe realizar una integración másica en la biorrefinería (ver literal 3.2) con el fin de reducir los PIA (J. Dávila, Rosenberg, and Cardona 2016) asegurando la obtención de productos que satisfagan las necesidades humanas. Es importante tener en cuenta que se requerirá mayores recursos para evitar que el impacto ambiental se materialice en comparación con el diseño de procesos que emitan, generen y representen un menor impacto ambiental (Young and Cabezas 1999). Entre las opciones para aprovechar las corrientes residuales de la biorrefinería está la utilización de la vinaza (proveniente de la destilación del bioetanol) para obtener biogás mediante degradación anaerobia (Guevara Bravo, Acevedo Ruiz, and Peláez Jaramillo 2016) y utilizarla en la producción de energía eléctrica o térmica gracias al metano contenido en el biogás (Fabio, Yujato, and Arenas 2017; Paneque 2011).

3.4. Análisis de posibles impactos sociales

3.4.1. Empleos directos e indirectos.

La biorrefinería generaría mínimo 30 empleos directos, los cuales están distribuidos en 27 empleos para operarios con un requerimiento mínimo de estudios técnicos, además de 3 supervisores con estudios mínimos de tercer nivel (carreras profesionales). Se establece que por cada 1000 T de banano procesado se generan 0,79 empleos, una cifra mayor a los 0,14 empleos / 1000 T de caña de azúcar procesada en la industria azucarera de Sao Paulo (Gnansounou et al. 2017). Esta mayor generación de empleos en la biorrefinería de banano de rechazo se debe a que el análisis económico se lo realizó considerando un nivel de control de procesos digital y se requiere mayor cantidad de empleados en comparación a un nivel automatizado de producción (Davis et al. 2015; Humbird et al. 2011).

Para la entrega de banano, se requieren 12,33 horas de viaje/día, lo que permite generar 1,54 empleos indirectos. Este resultado es similar al reportado en la literatura, en el que se manifiesta que se genera más empleo en el transporte desde las plantaciones hasta la planta de producción (Gnansounou et al. 2017). Sin embargo desde el punto de vista socio ambiental, por cada viaje de 200 km se aportarían 14724 kg CO₂ (Sawik, Faulin, and Pérez-Bernabeu 2017), lo cual afecta directamente a la contaminación de la ciudad, representando un impacto socio-ambiental negativo. La forma de contrarrestar estas emisiones sería mediante el planteamiento de una bioeconomía, en la cual se utilice combustibles renovables tales como el hidrógeno, metano, bioetanol o biodiesel para todos los viajes relacionados con la adquisición de materia prima (European Commission 2017; OLADE 2009).

3.4.2. Representación del salario neto mensual en la canasta básica familiar

El salario neto mensual para cada operario y supervisor corresponde a 654,02 USD y 821,64 USD respectivamente. Considerando el precio de la canasta básica familiar de la ciudad seleccionada, se determina que para los operarios que sean sostén de familia, tendrían una restricción de consumo de 29,50 USD/mes, lo que representa el 4,32% del precio de la canasta básica familiar. Sin embargo, al considerar que los operarios compartan los gastos familiares con una persona con remuneración básica unificada (437,50 USD/mes), tendría un saldo a favor de 408 USD/mes lo que le permitiría tener un mejor estatus económico. Por otro lado, para los supervisores que sean sostén de familia, tendrían un excedente de 138,12 USD/mes, representando una mejor situación económica en comparación a los operarios.

3.4.3. Equidad de género

Se determinó que de los 27 operarios, 11 corresponderán al género femenino y de los 3 supervisores necesarios, 2 serán mujeres, con lo cual, las mujeres representaron el 43,33% de la mano de obra requerida en la biorrefinería. Esto se determinó con el fin de contrarrestar la inequidad de género existente en la provincia del Oro al año 2015 en el sector manufacturero y minero, en la cual las mujeres representaron el 30,88% del total de trabajadores (INEC 2016a) y a su vez a nivel nacional las mujeres representan el 25,90% del total de trabajadores en el sector manufacturero (INEC 2016b).

Debido al alcance de este estudio, no se puede determinar con mayor profundidad otros impactos sociales tales como la subida de precios del banano y el uso de tierras. Estos temas son importantes para la seguridad alimentaria, ya que tanto la producción de alimentos y biomateriales se producen a partir de biomasa y por lo tanto se requiere tierras para su cultivo (Palmeros Parada, Osseweijer, and Posada Duque 2016). Sin embargo, analizar los posibles impactos sociales en el desarrollo de biorrefinerías permite lograr una mayor integración con la ciudadanía y eso es fundamental para las bioindustrias modernas, debido que generar una aceptación social para nuevos proyectos es esencial para el desarrollo de soluciones sostenibles (Budzianowski and Postawa 2016).

4. CONCLUSIONES

El banano de rechazo es una materia prima con buen potencial para la obtención de PHB y BREN debido a sus características amiláceas y lignocelulósicas de la pulpa y cáscara respectivamente. El diseño propuesto de una biorrefinería para obtener PHB y BREN no es económicamente viable debido a los altos costos de producción. El análisis ambiental del proceso propuesto nos confirma a su vez, la necesidad de aprovechar los residuos generados tales como la glucosa, lignina y CO₂ con el fin de minimizar los PIA/kg de producto. Los posibles impactos sociales que genera la biorrefinería son positivos, ya que brinda la oportunidad de generar un desarrollo socio-económico alrededor de un fruto que es desperdiciado por no cumplir con los estándares de calidad para exportación.

Esta investigación aporta a la connotación de una de las diferentes opciones que tiene Ecuador para el cambio de su matriz productiva y energética mediante el aprovechamiento de biomasa residual agrícola. A su vez abre las puertas para la realización de futuros trabajos en los que se analice la integración másica y energética, se determine la óptima localización de la biorrefinería para minimizar los costos de transporte y garantizar la recolección de la materia prima con el fin de reducir los costos de producción y ser competitivos en el mercado ecuatoriano.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, Nurhayati, Fauziah Sulaiman, Muhamad Azman Miskam, and Rahmad Mohd Taib. 2014. "Characterization of Banana (*Musa Spp.*) Pseudo-Stem and Fruit-Bunch-Stem as a Potential Renewable Energy Resource." *International Journal of Biological, Veterinary and Agricultural Engineering* 8(8): 794–98.
- Afanador, Angélica María. 2006. "El Banano Verde de Rechazo En La Producción de Alcohol Carburante." *EIA* 3(1794–1237): 51–68.
- Ahmad, Mior et al. 2015. "Case Study for a Palm Biomass Biore Fi Nery Utilizing Renewable Non-Food Sugars from Oil Palm Frond for the Production of Poly (3-Hydroxybutyrate) Bioplastic." *Journal of Cleaner Production* 87: 284–90.
- Akintayo, E.T. 2004. "Characteristics and Composition of *Parkia Biglobbosa* and *Jatropha Curcas* Oils and Cakes." *Bioresource Technology* 92(3): 307–10. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852403001974> (May 7, 2017).
- Akiyama, Minoru, Takeharu Tsuge, and Yoshiharu Doi. 2003. "Environmental Life Cycle Comparison of Polyhydroxyalkanoates Produced from Renewable Carbon Resources by Bacterial Fermentation." *Polymer Degradation and Stability* 80(1): 183–94.
- Alibaba. 2017. "Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the World's Largest Online B2B Marketplace." *Alibaba*. https://www.alibaba.com/?src=sem_ggl&cmpgn=678190955&adgrp=34276573373&fditm=&tgt=kwd-14739453&locintrst=&locphyscl=1003659&mtchtyp=e&ntwrk=g&device=c&dvcmdl=&creative=148007444336&plcmnt=&plcmntcat=&p1=&p2=&aceid=&position=1t1&gclid=EAlalQobChMlgce3i9XQ1 (November 21, 2017).
- Álvarez-chávez, Clara Rosalía, Sally Edwards, Rafael Moure-eraso, and Kenneth Geiser. 2012. "Sustainability of Bio-Based Plastics: General Comparative Analysis and Recommendations for Improvement." *Journal of Cleaner Production* 23(1): 47–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.003>.
- Arumugam, R, and M Manikandan. 2011. "Fermentation of Pretreated Hydrolyzates of Banana and Mango Fruit Wastes for Ethanol Production." *Asian Journal of Experimental Biological Science* 2(2): 246–56.
- BCE. 2017. "Tasas de Interés." *Banco Central del Ecuador*. <https://contenido.bce.fin.ec/>.
- Beishizen, J. W. 1988. Carbohydrate chemistry *Sugar Syrups from Maize*.

- Biocycle. 2017. "Productos Biocycle." <http://www.biocycle.com.br/site.htm> (November 21, 2017).
- Bioenarea. 2013. *Bioenarea Biorrefinerías Una Oportunidad de Negocio Para Las Zonas Rurales Y Las Industrias*.
- Brooks, Aa. 2008. "Ethanol Production Potential of Local Yeast Strains Isolated from Ripe Banana Peels." *African journal of Biotechnology* 7(20): 3749–52. <http://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/59424>.
- Budzianowski, Wojciech M., and Karol Postawa. 2016. "Total Chain Integration of Sustainable Biorefinery Systems." *Applied Energy* 184: 1432–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.050>.
- Cabezas, Heriberto, Jane C. Bare, and Subir K. Mallick. 1999. "Pollution Prevention with Chemical Process Simulators: The Generalized Waste Reduction (WAR) Algorithm - Full Version." *Computers and Chemical Engineering* 23(4–5): 623–34.
- Castellanos Domínguez, Óscar Fernando, Gloria Teresa Cruz Guerrero, Gloria González, and Andira Yesil Rentería Ayala. 2004. "Alternativas Para La Clarificación Del Jarabe de Glucosas Obtenido Por Hidrólisis Enzimática Del Almidón." *Ingeniería e Investigación* 24(2): 8–21. <http://www.redalyc.org/pdf/643/64324202.pdf>.
- Choi, Jong-il, and Sang Yup Lee. 1997. "Process Analysis and Economic Evaluation for Poly (3-Hydroxybutyrate) Production by Fermentation." 17.
- Codana. 2017. "Codana S.A. | Excelencia En Calidad." *Grupo Nobis*. <http://www.codana.com/> (November 21, 2017).
- Danmaliki, Gaddafi I, Auwal M Muhammad, Abdullahi A Shamsuddeen, and Bashir J Usman. 2016. "Bioethanol Production from Banana Peels." 10(6): 56–62.
- Dávila, Javier A., Moshe Rosenberg, and Carlos A. Cardona. 2017. "A Biorefinery for Efficient Processing and Utilization of Spent Pulp of Colombian Andes Berry (*Rubus Glaucus Benth.*): Experimental, Techno-Economic and Environmental Assessment." *Bioresource Technology* 223: 227–36.
- Dávila, Javier A., Moshe Rosenberg, Eulogio Castro, and Carlos A. Cardona. 2017. "A Model Biorefinery for Avocado (*Persea Americana Mill.*) Processing." *Bioresource Technology* 243: 17–29.
- Dávila, Javier, Moshe Rosenberg, and Carlos Cardona. 2016. "A Biorefinery Approach for the Production of Xylitol, Ethanol and Polyhydroxybutyrate from Brewer's Spent Grain." *AIMS Agriculture and Food* 1(1): 52–66.

<http://www.aimspress.com/journal/agriculture%5Cnhttp://www.aimspress.com/article/10.3934/agrfood.2016.1.52>.

- Davis, R. et al. 2015. National Renewable Energy Laboratory-NREL *Process Design and Economics for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbons: Dilute-Acid and Enzymatic Deconstruction of Biomass to Sugars and Biological Conversion of Sugars to Hydrocarbons*. <http://www.osti.gov/servlets/purl/1107470/>.
- Duque Quinaya, Sergio H. 2014. "Evaluación Y Simulación de La Producción de Glucosa a Partir Del Platano Y Sus Residuos Como Alternativa Competitiva En El Mercado Nacional."
- European bioplastics. 2016. "Environmental Communication Guide for Bioplastics." : 1–36.
- European Commission. 2017. *Bio-Based Products Final Report*.
- Evelyn Tapia. 2015. "Mayor Demanda de Alcohol En El País." *El Comercio*. <http://www.elcomercio.com/actualidad/mayor-demanda-alcohol-pais.html> (November 20, 2017).
- Fabio, García, Marco Yujato, and Adiel Arenas. 2017. *Manual Estadística Energética 2017*.
- Fernández-Dacosta, Cora et al. 2015. "Microbial Community-Based Polyhydroxyalkanoates (PHAs) Production from Wastewater: Techno-Economic Analysis and Ex-Ante Environmental Assessment." *Bioresource Technology* 185: 368–77.
- García, Carlos A., Jonathan Moncada, Valentina Aristizábal, and Carlos A. Cardona. 2017. "Techno-Economic and Energetic Assessment of Hydrogen Production through Gasification in the Colombian Context: Coffee Cut-Stems Case." *International Journal of Hydrogen Energy* 42(9): 5849–64.
- Gerssen-Gondelach, S. J. et al. 2014. "Competing Uses of Biomass: Assessment and Comparison of the Performance of Bio-Based Heat, Power, Fuels and Materials." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40(April): 964–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.197>.
- Gnansounou, Edgard, Catarina M. Alves, Elia Ruiz Pachón, and Pavel Vaskan. 2017. "Comparative Assessment of Selected Sugarcane Biorefinery-Centered Systems in Brazil: A Multi-Criteria Method Based on Sustainability Indicators." *Bioresource Technology* 243: 600–610. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.004>.

- Guevara Bravo, Carlos, José Acevedo Ruiz, and Carlos Peláez Jaramillo. 2016. "Biorrefinería a Partir de Banano de Rechazo: Un Sistema Integrado Para La Co-Producción de Etanol, Proteína Unicelular, Biogás Y Compost." *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 14(1): 78. <http://revistabioteconologia.unicauca.edu.co/revista/index.php/bioteconologia/articulo/view/438>.
- Hames, B, C Scarlata, and A Sluiter. 2008. National Renewable Energy Laboratory (NREL) *Determination of Protein Content in Biomass NREL/TP-510-42625*.
- Hames, Bonnie et al. 2004. Biomass Analysis Technology Team Laboratory Analytical Procedure *Preparation of Samples for Compositional Analysis NREL/TP-510-42620*.
- Happi Emaga, Thomas et al. 2008. "Dietary Fibre Components and Pectin Chemical Features of Peels during Ripening in Banana and Plantain Varieties." *Bioresource Technology* 99(10): 4346–54.
- Humbird, D et al. 2011. "Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover." *Renewable Energy* 303(May): 147. <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/47764.pdf>.
- IndexMundi. 2017. "Commodity Prices - Price Charts, Data, and News." *Indexmundi*. <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=dap-fertilize> (November 21, 2017).
- INEC. 2015. *Encuesta de Superficie Y Producción Agropecuaria Continua Espac 2015*.
- . 2016a. "Encuesta de Manufactura Y Minería 2015." *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/manufactura-y-mineria/> (November 22, 2017).
- . 2016b. *Encuestas Industriales 2015*.
- . 2016c. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos *Informe Ejecutivo - Encuesta de Superficie Y Producción Agropecuaria Continua ESPAC 2016*.
- . 2017a. *Canasta Familiar Básica Y Canasta Familiar Vital de La Economía Dolarizada*.
- . 2017b. *Reporte de Economía Laboral - Septiembre 2017*. Quito - Ecuador.
- Kaboli, A, M B Aryanezhad, K Shahanaghi, and R Tavakkoli-Moghaddam. 2007. "A Holistic Approach Based on Mcdm for Solving Location Problems." *International*

Journal of Engineering Transactions A Basics 20(3): 251–62.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.4455&rep=rep1&type=pdf>.

Kongkasawan, Jinjuta, Hyungseok Nam, and Sergio C. Capareda. 2016. “Jatropha Waste Meal as an Alternative Energy Source via Pressurized Pyrolysis: A Study on Temperature Effects.” *Energy* 113: 631–42.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544216309549> (March 24, 2017).

López, J., J. Cuarán, L. Arenas, and L. Flórez. 2014. “Usos Potenciales de La Cáscara de Banano : Elaboración de Un Bioplástico.” *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales* 1: 7–21.

MAGAP. 2017. “Geoportal Del Agro Ecuatoriano.” *Ministerio de agricultura y ganadería*. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/mapasint.html> (November 23, 2017).

McGuire, Julia B. et al. 2017. “Social Acceptability of Establishing Forest-Based Biorefineries in Maine, United States.” *Biomass and Bioenergy* 105: 155–63.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.015>.

MEER. 2014. *Atlas Bioenergético Del Ecuador*. Primera. Quito: Ministerio coordinador de producción, empleo y competitividad - Ministerio de electricidad y energía renovable - Instituto nacional de preinversión.

Mettler-Toledo. 2011. “Analizador de Humedad HB43-S - Instrucciones de Manejo.” : 72.
http://www.mt.com/dam/product_organizations/laboratory_weighing/moisture/products/hb43_s/documentation/es/HB43-S-OI-es-11780963A.pdf.

Ministerio del trabajo. 2015. *Regulación de Las Relaciones de Trabajo Especiales Del Sector Del Transporte Terrestre de Pasajeros Y de Cargas, En Todas Sus Modalidades*. Ecuador. [file:///C:/Users/Yadira Vargas G/Documents/1. Utadeo/Tesis/social/Acuerto-Minsterial-262-Regulacion-de-las-Relaciones-de-Trabajo-Especiales-del-Sector-de-Transporte-Terrestre-de-Pasajeros-y-de-Carga.pdf](file:///C:/Users/Yadira%20Vargas%20G/Documents/1.%20Utadeo/Tesis/social/Acuerto-Minsterial-262-Regulacion-de-las-Relaciones-de-Trabajo-Especiales-del-Sector-de-Transporte-Terrestre-de-Pasajeros-y-de-Carga.pdf).

———. 2017. *Salarios Mínimos Sectoriales 2017*.
<http://cdn.ecuadorlegalonline.com/wp-content/uploads/2017/01/tabla-minimos-sectoriales-2017.pdf>.

Mohapatra, Debandya, Sabyasachi Mishra, and Namrata Sutar. 2010. “Banana and Its by-Product Utilisation: An Overview.” *Journal of Scientific and Industrial Research* 69(5): 323–29.

- Moncada, Jonathan. 2012. "Design and Evaluation of Sustainable Biorefineries from Feedstock in Tropical Regions." Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Moncada, Jonathan, Carlos A. Cardona, and Luis E. Rincón. 2015. "Design and Analysis of a Second and Third Generation Biorefinery: The Case of Castorbean and Microalgae." *Bioresource Technology* 198: 836–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.077>.
- Moncada, Jonathan, Mahmoud M. El-Halwagi, and Carlos A. Cardona. 2013. "Techno-Economic Analysis for a Sugarcane Biorefinery: Colombian Case." *Bioresource Technology* 135: 533–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.137>.
- Moncada, Jonathan, Johnny Tamayo, and Carlos A. Cardona. 2014. "Evolution from Biofuels to Integrated Biorefineries: Techno-Economic and Environmental Assessment of Oil Palm in Colombia." *Journal of Cleaner Production* 81: 51–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.021>.
- Moncada B., Jonathan, Valentina Aristizábal M., and Carlos A. Cardona A. 2016. "Design Strategies for Sustainable Biorefineries." *Biochemical Engineering Journal* 116: 122–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>.
- Monsalve G., Jhon F., Victoria Isabel Medina de Perez, and Angela Adriana Ruiz Colorado. 2006. "Ethanol Production of Banana Shell and Cassava Starch." *Dyna* 150(0012–7353): 21–27.
- Moreira Carrión, Karina. 2013. "Reutilización de Residuos de La Cáscara de Bananos (*Musa Paradisiaca*) Y Plátanos (*Musa Sapientum*) Para La Produccion de Alimentos Destinados Al Consumo Humano." Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/3666/1/1113.pdf>.
- Naranjo, Javier M., Carlos A. Cardona, and Juan C. Higueta. 2014. "Use of Residual Banana for Polyhydroxybutyrate (PHB) Production: Case of Study in an Integrated Biorefinery." *Waste Management* 34(12): 2634–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.007>.
- OEC. 2016. "Importacion de Alcoholes, Aceites Y Ácidos Grasos En Ecuador." *Observatory of Economic Complexity*. https://atlas.media.mit.edu/es/visualize/tree_map/hs92/import/ecu/show/3823/2016/ (November 20, 2017).
- OLADE. 2009. *Basic Statistics Report 2009*. Quito. http://www.olade.org.ec/sites/default/files/publicaciones/IEE-2008_0.pdf.
- Palmeros Parada, Mar, Patricia Osseweijer, and John A. Posada Duque. 2016.

- “Sustainable Biorefineries, an Analysis of Practices for Incorporating Sustainability in Biorefinery Design.” *Industrial Crops and Products* 106: 105–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.052>.
- Paneque, Dr Manuel. 2011. *Estado Del Arte Y Novedades de La Bioenergía En Chile*. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura.
- Piedrahita Hernández, Valentina. 2015. “Techno – Economic and Environmental Assessment of the Use of Lignocellulosic Residues for Biofertilizers Production.” Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Posada, John A. et al. 2011. “Design and Analysis of Poly-3-Hydroxybutyrate Production Processes from Crude Glycerol.” *Process Biochemistry* 46: 310–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2010.09.003>.
- ProEcuador. 2016a. *Análisis Sectorial Banana 2016*. Quito.
- . 2016b. *Informe Sobre El Sector Bananero Ecuatoriano*.
- PROECUADOR. 2015. “Análisis Sectorial, Plásticos Del Hogar.” *Ministerio de Comercio Exterior*: 1–14. <http://www.proecuador.gob.ec/pubs/perfil-de-plasticos-del-hogar-2015/> (November 20, 2017).
- Quintero, Julián A., Jonathan Moncada, and Carlos A. Cardona. 2013. “Techno-Economic Analysis of Bioethanol Production from Lignocellulosic Residues in Colombia: A Process Simulation Approach.” *Bioresource Technology* 139: 300–307. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.048>.
- Repsol. 2017. “Precios de Venta de Productos Petroleros.” *Repsol*. https://www.repsol.com/ec_es/ecuador/productos-servicios/industria/precios/ (November 21, 2017).
- Romijn, Henny et al. 2014. “Economic and Social Sustainability Performance of Jatropha Projects: Results from Field Surveys in Mozambique, Tanzania and Mali.” *Sustainability (Switzerland)* 6(9): 6203–35.
- Rusendi, Dadi. 1994. “Enzymatic Hydrolysis of Potato Processing Waste for The Production of Biopolymer.” Macdonald Campus of McGill University.
- Saratale, Ganesh D., and Min Kyu Oh. 2015. “Characterization of Poly-3-Hydroxybutyrate (PHB) Produced from Ralstonia Eutropha Using an Alkali-Pretreated Biomass Feedstock.” *International Journal of Biological Macromolecules* 80: 627–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.07.034>.
- Sawik, Bartosz, Javier Faulin, and Elena Pérez-Bernabeu. 2017. “A Multicriteria

- Analysis for the Green VRP: A Case Discussion for the Distribution Problem of a Spanish Retailer.” *Transportation Research Procedia* 22: 305–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.037>.
- Sluiter, A et al. 2008. National Renewable Energy Laboratory (NREL) *Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved Solids in Liquid Process Samples NREL/TP-510-42621*.
- . 2012. *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass NREL/TP-510-42618*.
- Sluiter, Amie, Bonnie Hames, et al. 2008. *Determination of Ash in Biomass NREL/TP-510-42622*. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18832302>.
- Sluiter, Amie, Raymond O Ruiz, et al. 2008. National Renewable Energy Laboratory (NREL) *Determination of Extractives in Biomass NREL/TP-510-42619*.
- SRI. 2017. “Gaceta Tributaria.” *Servicio de rentas interas*. <http://www.sri.gob.ec/web/guest/home> (November 21, 2017).
- Tavakkoli-Moghadam, R., and S.M. Mousavi. 2011. “An Integrated AHP-VIKOR Methodology for Plant Location Selection.” *IJE Transactions B: Applications* 24(2): 127–37.
- Valero-Valdivieso, Mf, Y Ortegon, and Y Uscategui. 2013. “Biopolymers: Progress and Prospects.” *SciELO Colombia* 181: 171–80. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/viewFile/20642/42269>.
- Velásquez Arredondo, H. I., A. A. Ruiz Colorado, and S. De Oliveira. 2010. “Ethanol Production Process from Banana Fruit and Its Lignocellulosic Residues: Energy Analysis.” *Energy* 35(7): 3081–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.052>.
- Villaverde, Juan José et al. 2013. “High Valuable Compounds from the Unripe Peel of Several Musa Species Cultivated in Madeira Island (Portugal).” *Industrial Crops and Products* 42(1): 507–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.037>.
- Wang, Runguo, Jichuan Zhang, Hailan Kang, and Liqun Zhang. 2016. “Design, Preparation and Properties of Bio-Based Elastomer Composites Aiming at Engineering Applications.” *Composites Science and Technology* 133: 136–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.07.019>.
- Young, Douglas M., and Heriberto Cabezas. 1999. “Designing Sustainable Processes with Simulation: The Waste Reduction (WAR) Algorithm.”

Computers and Chemical Engineering 23(10): 1477–91.

Zhang, Pingyi, Roy L. Whistler, James N. Bemiller, and Bruce R. Hamaker. 2005. "Banana Starch: Production, Physicochemical Properties, and Digestibility - A Review." *Carbohydrate Polymers* 59(4): 443–58.