

EVALUACIÓN ECONÓMICA CON OPCIONES REALES: BIOREFINERÍA DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN EN VERACRUZ, MÉXICO

ECONOMIC EVALUATION WITH REAL OPTIONS: SECOND GENERATION BIOETHANOL BIOREFINERY IN VERACRUZ, MEXICO

Miguel A. Cisneros-López¹, José A. García-Salazar^{1*}, José S. Mora-Flores¹, Miguel A. Martínez-Damian¹, Roberto C. García-Sánchez¹, José R. Valdez-Lazalde², Marcos Portillo-Vázquez³

¹Economía. ²Ciencias Forestales. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México (jsalazar@colpos.mx). ³División de Ciencias Económico Administrativas. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Carretera México-Texcoco Km 38.5, Estado de México.

RESUMEN

La producción de bioetanol de primera generación en México podría traer inconvenientes, pues algunas materias primas provendrían de cultivos alimenticios como maíz y caña de azúcar, lo que provocaría inestabilidad de precios y desabasto en el mercado. El bioetanol de segunda generación sería una buena solución para tener combustibles menos contaminantes de manera sustentable. El objetivo de este estudio fue evaluar la factibilidad económica, con opciones reales, de una biorefinería que producirá bioetanol a partir de desperdicios de caña de azúcar, se supone que estaría ubicada junto al mayor ingenio de Veracruz. Se estimó que la biorefinería tendrá una capacidad anual de 143 millones de litros y una inversión total del proyecto de 308 millones de dólares. Se empleó la opción real de abandono del proyecto, para 5, 10, 15, 20 y 25 años y se hizo la evaluación tradicional para 30 años. Los resultados indican que hasta el año 20 la biorefinería tendría un valor actual neto de 27.3 millones de dólares, y para el año 30 un valor actual neto de 61.1 millones de dólares, el precio del bioetanol es la variable que más afecta a la rentabilidad de una biorefinería de este tipo.

Palabras clave: bioetanol de segunda generación, biorefinería, opciones reales.

INTRODUCCIÓN

Durante el último siglo la temperatura anual promedio de la superficie terrestre aumentó en 0.7 °C, y se espera que aumente aún más, en el rango de 0.8 a 2.6 °C para el año 2050.

ABSTRACT

First generation bioethanol production in Mexico could have disadvantages, since some prime materials would come from food crops such as maize and sugarcane, causing instability in prices and market shortage. Second generation bioethanol could be a good solution to have fuels that are less pollutant, in a sustainable manner. The objective of this study was to evaluate the economic feasibility, with real options, of a biorefinery that will produce bioethanol from sugarcane wastes, and which is supposed to be located next to the largest sugar factory in the state of Veracruz. It is estimated that the biorefinery will have an annual capacity of 143 million liters and a total investment for the project of 308 million dollars. The real option of abandoning the project was used, for 5, 10, 15, 20 and 25 years, and traditional evaluation for 30 years. The results indicate that the biorefinery would have a net present value of 27.3 million dollars until year 20, and a net present value of 61.1 million dollars for year 30. The price of bioethanol is the variable that affects most the profitability of a biorefinery of this type.

Key words: second generation bioethanol, biorefinery, real options.

INTRODUCTION

During the last century the average annual temperature of the Earth surface increased by 0.7 °C, and it is expected that it will rise even more, in the range of 0.8 to 2.6 °C for the year 2050. Shrinkage of glaciers and marine ice has been observed. Hurricanes are stronger and most frequent. These phenomena are associated to global warming and can have serious implications in the Earth ecosystems. To a great extent, this is a

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: mayo, 2016. Aprobado: enero, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en ASyD 17: 397-413. 2020.

Se ha observado una disminución de los glaciares y hielo marino. Los huracanes son de mayor magnitud y frecuencia. Estos fenómenos son asociados al calentamiento global y pueden llegar a tener serias implicaciones en los ecosistemas de la Tierra. Esto se debe en gran medida a las emisiones de gases de efecto invernadero (Leduc, 2009). De estos gases, el CO₂ representa más del 80% (EEA, 2008). En el caso de México, se encuentra ubicado en el lugar 15 de los países con mayor volumen de emisiones de CO₂ (IEA, 2014; SEMARNAT, 2016).

A nivel mundial dos actividades generadas por el hombre, generación de energía (eléctrica, térmica) y el transporte, produjeron casi dos tercios de las emisiones globales de CO₂. Mientras la generación de energía proviene de muchas fuentes, el sector del transporte depende casi exclusivamente de combustibles fósiles en un 97% (IEA, 2014).

Por otra parte, cabe señalar que en México la importación de gasolina es creciente la cual se estima en 25 mil millones de litros anuales, por tanto, la producción de biocombustibles podría revertir de alguna manera esta situación y favorecer el medio ambiente (SENER, 2014).

Existe una clasificación de biocombustibles, llamados de primera generación y de segunda generación, la principal diferencia entre ellos son las materias primas empleadas. Los biocombustibles de primera generación utilizan cultivos agrícolas. Por ejemplo, para producir bioetanol, se puede utilizar el maíz (*Zea mays*), la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), la remolacha azucarera (*Beta vulgaris*), y el sorgo grano (*Sorghum* spp.); en el caso de biodiesel, se puede utilizar la palma de aceite (*Elaeis guineensis*), la jatropha (*Jatropha curcas*), la soya (*Glycine max*), la colza (*Brassica napus*), el cártamo (*Carthamus tinctorius*) y el girasol (*Helianthus annuus*) (SENER, 2006). Los biocombustibles de segunda generación se obtienen principalmente de desperdicios agrícolas, agroindustriales y forestales (Mohrn y Raman, 2013).

El bioetanol de primera generación ya se produce a escala mundial. En el año 2000, se produjeron 13 mil millones de litros y para el 2014 se alcanzó una cifra de 94 mil millones de litros, un incremento de más de 700%. Los principales productores son Estados Unidos y Brasil (REN21, 2017; WBA, 2017). En México, la producción de bioetanol a escala comercial es inexistente, pero Petróleos Mexicanos (PEMEX) adjudicó en 2015 una licitación a 10 años con

result of greenhouse gas emissions (Leduc, 2009). Of these gases, CO₂ represents more than 80% (EEA, 2008). In the case of Mexico, it is ranked 15 among the countries with highest volume of CO₂ emissions (IEA, 2014; SEMARNAT, 2016).

Globally, two activities generated by humans, energy generation (electric, thermal) and transport, produced nearly two thirds of the global CO₂ emissions. While energy generation comes from many sources, the transport sector depends almost exclusively on fossil fuels in 97% (IEA, 2014).

On the other hand, it should be mentioned that gasoline imports are increasing in Mexico, estimated to be 25 billion liters annually; therefore, the production of biofuels could somehow revert this situation and benefit the environment (SENER, 2014).

There is a classification of biofuels as first generation and second generation, the main difference between them being the prime materials used. First generation biofuels use agricultural crops. For example, to produce bioethanol, the following can be used: maize (*Zea mays*), sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), sugar beet (*Beta vulgaris*), and sorghum grain (*Sorghum* spp.). In the case of biodiesel, the following can be used: oil palm (*Elaeis guineensis*), jatropha (*Jatropha curcas*), soybean (*Glycine max*), colza (*Brassica napus*), safflower (*Carthamus tinctorius*), and sunflower (*Helianthus annuus*) (SENER, 2006). Second generation biofuels are obtained primarily from agricultural, agro-industrial and forestry wastes (Mohrn and Raman, 2013).

First generation bioethanol is already produced worldwide. In the year 2000, 13 billion liters were produced and by 2014 a figure of 94 billion liters was reached, an increase of 700%. The main producers are the United States and Brazil (REN21, 2017; WBA, 2017). In Mexico, bioethanol production at a commercial scale is inexistente, although Mexican Petroleum (*Petróleos Mexicanos*, PEMEX) opened bidding in 2015 to 10 years for several Mexican companies to produce bioethanol, to be mixed in 5.8% with gasolines. Bioethanol will come from sugarcane juice, produced in San Luis Potosí and Veracruz, as well as from sorghum grain, produced in Tamaulipas (PEMEX, 2015a).

First generation biofuels present some important inconveniences: a) They can compromise the supply of some crops devoted to food, such as

varias empresas mexicanas para producir bioetanol, para mezclarse en 5.8% con las gasolinas. El bioetanol provendrá del jugo caña de azúcar, producido en San Luis Potosí y Veracruz; así como de grano de sorgo, producido en Tamaulipas (PEMEX, 2015a).

Los biocombustibles de primera generación presentan algunos inconvenientes importantes: a) Pueden comprometer el abasto de algunos cultivos dedicados a la alimentación, como el maíz, la caña de azúcar, trigo, etcétera; b) Como consecuencia del punto anterior, se genera un aumento en la demanda de los cultivos agrícolas lo cual contribuye a un aumento en sus precios; y c) Podrían acelerar la deforestación, pues se busca tener más superficie agrícola que cultivar y en muchos casos se hace en terrenos forestales. En este contexto el empleo de desperdicios agrícolas y forestales para producir bioetanol es una alternativa, que viene a contrarrestar ciertas desventajas de los biocombustibles de primera generación (Mohrn y Raman, 2013).

A nivel mundial, la producción de bioetanol de segunda generación es mínima, pero ya se encuentran algunas biorefinerías que están iniciando operaciones en escala comercial en Estados Unidos, Brasil, China, e Italia (DOE, 2015; EBTP, 2016).

En México se han hecho varios estudios del potencial anual de desperdicios agrícolas para la producción de bioetanol de segunda generación (Masera *et al.*, 2005; SENER, 2006; UNCTAD, 2012), se han identificado diversas fuentes potenciales de desperdicios agrícolas con vocación energética, como son rastrojos de cultivos agrícolas: maíz, caña de azúcar, arroz, cebada, sorgo dulce y trigo. Así como algunos subproductos agroindustriales: bagazo de caña de azúcar, olotes de maíz, cascaras de arroz, trigo, café y girasol. En UNCTAD (2012) se estimó un potencial anual de bioetanol de segunda generación en México, a partir del desperdicio de varios cultivos: 3 405 millones de litros derivados de caña de azúcar; 383 millones de litros derivados de sorgo dulce; 151 millones de litros derivados de café; 99 millones de litros derivados de trigo; y 17 millones de litros derivados de arroz.

Desde hace años, el gobierno mexicano ha mostrado interés por producir bioetanol de segunda generación, pues a raíz de un amplio estudio titulado "Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México" (SENER, 2006), se resaltó el potencial de la biomasa generada

maize, sugarcane, wheat, etc.; b) As consequence of the previous point, an increase in the demand of agricultural crops is generated, which contributes to an increase in their prices; and c) It could accelerate deforestation, since it is sought to have a larger agricultural surface to cultivate and in many cases this is done in forest lands. In this context the use of agricultural and forestry wastes to produce bioethanol is an alternative, that can counteract certain disadvantages of first generation biofuels (Mohrn and Raman, 2013).

Globally, second generation bioethanol production is minimal, but there are already some biorefineries that are beginning operations at the commercial scale in the United States, Brazil, China and Italy (DOE, 2015; EBTP, 2016).

In Mexico, many studies have been made of the annual potential of agricultural wastes for second generation bioethanol production (Masera *et al.*, 2005; SENER, 2006; UNCTAD, 2012), and diverse potential sources of agricultural wastes have been identified with energetic vocation, such as stubble from agricultural crops: maize, sugarcane, rice, barley, sweet sorghum, and wheat. It is also the case of some agribusiness byproducts: sugarcane bagasse, maize cobs, and rice, wheat, coffee and sunflower husks. In UNCTAD (2012) an annual potential of second generation bioethanol was estimated in Mexico, from the waste of several crops: 3 405 million liters derived from sugarcane; 383 million liters derived from sweet sorghum; 151 million liters derived from coffee; 99 million liters derived from wheat; and 17 million liters derived from rice.

Since years ago, the Mexican government has shown interest for producing second generation bioethanol, since the potential of the biomass generated in agricultural wastes to produce bioethanol was emphasized as a result of a broad study titled "Potential and Viability of Bioethanol and Biodiesel Use for Transport in Mexico" (SENER, 2006), which influenced the writing of the Law of Bioenergetics Promotion and Development (DOF, 2008).

In Mexico, many authors have carried out economic studies of bioethanol derived from sugarcane, as a first generation biofuel (Domínguez, 2008; Rivera, 2010; Brambila *et al.*, 2013; Alemán-Nava *et al.*, 2015). In the case of second generation bioethanol, there is scarce information (SENER, 2006; IEA, 2010).

en los desperdicios agrícolas para producir bioetanol, lo cual influyó en la redacción de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (DOF, 2008). En México, varios autores han realizado estudios económicos del bioetanol derivado de la caña de azúcar, como biocombustible de primera generación (Dominguez, 2008; Rivera, 2010; Brambila et al., 2013; Alemán-Nava et al., 2015). En el caso del bioetanol de segunda generación, existe poca información (SENER, 2006; IEA, 2010).

Cabe señalar que tampoco se han hecho estudios de impacto ambiental para conocer el efecto del uso masivo de biocombustibles en México.

Se encontró un estudio relacionado con el impacto ambiental del CO₂, Sheimbaum et al. (2011), en donde se examina el consumo de energía y su relación con las emisiones de CO₂ en Argentina, Brasil, Colombia, México y Venezuela de 1990 a 2006. Los resultados indican que aun cuando se han logrado reducciones significativas en la intensidad energética en Colombia, México y en menor medida en Brasil y Argentina, la reducción de emisiones de CO₂ en estos países no ha sido significativa debido a una alta dependencia de los combustibles fósiles como fuente de energía.

Las opciones reales son una metodología de evaluación económica de proyectos, la cual evalúa económicamente las decisiones que pudiera enfrentar un gerente (Brambila et al., 2013), estas podrían ser: diferir o posponer proyecto, ampliar operaciones, reducir operaciones, abandonar operaciones, seguir operaciones, cambiar de producto, etcétera. En el cálculo del valor de cada opción, se pueden emplear arboles de decisión, ecuaciones diferenciales (Black-Scholes) y simulación de Montecarlo, de acuerdo con Mun (2002).

Las opciones reales son una herramienta adecuada para la evaluación de proyectos de inversión en el sector de la energía renovable, los cuales presentan escenarios en condiciones de riesgo e incertidumbre, y los métodos tradicionales de valoración de inversiones, tales como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), no toman en cuenta dichas circunstancias (Fleten et al., 2012). Brambila et al. (2013) emplearon las opciones reales para evaluar la viabilidad en términos financieros de producir azúcar o bioetanol en un ingenio.

La hipótesis planteada fue que la producción de bioetanol de segunda generación es factible económicamente en México, las variables que más podrían

It should also be pointed out that environmental impact studies have not been done to understand the effect of the massive use of biofuels in Mexico.

A study related to the environmental impact of CO₂, was found (Sheimbaum et al. (2011), where energy consumption and its relation to CO₂ emissions was examined in Argentina, Brazil, Colombia, Mexico and Venezuela from 1990 to 2006. The results indicate that even when significant reductions in energetic intensity have been achieved in Colombia, Mexico and in Brazil and Argentina, to a lesser degree, the reduction of CO₂ emissions in these countries has not been significant due to a high dependency on fossil fuels as source of energy.

Real options valuation is a methodology of economic evaluation of projects, which evaluates economically the decisions that a manager could face (Brambila et al., 2013); these could be differing or postponing a project, broadening operations, reducing operations, abandoning operations, continuing operations, changing product, etc. In the calculation of the value of each option, decision trees can be used, as well as differential equations (Black-Scholes) and Montecarlo simulation, according to Mun (2002).

Real options valuation is an adequate tool to evaluate investment projects in the renewable energy sector, which present scenarios under conditions of risk and uncertainty; instead, the traditional methods of investment valuation, such as net present value (NPV) and internal rate of return (IRR), do not take into account these circumstances (Fleten et al., 2012). Brambila et al. (2013) used real options to evaluate the financial viability of producing sugar or bioethanol in a sugar factory.

The hypothesis set out was that second generation bioethanol production is economically feasible in Mexico, the variables that could affect profitability most in face of a change in some scenario are: size of the biorefinery, price of bioethanol, level of project leverage (% of financing), discount rate, bank loan rate, and biomass yield to be turned into bioethanol. Based on this, the objective of the study was to perform an economic evaluation of a biorefinery that produces bioethanol fuel from wastes generated in the sugarcane field and in the sugarcane factories; the real option of abandoning operations was evaluated to determine the economic feasibility. Also, to determine the economic factors that most affect

afectar la rentabilidad ante un cambio en algún escenario son: el tamaño de la biorefinería, el precio del bioetanol, el nivel de apalancamiento del proyecto (% de financiamiento), la tasa de descuento, la tasa de préstamo bancario y el rendimiento de la biomasa para convertirse en bioetanol. Con base a lo anterior, el objetivo del estudio fue realizar una evaluación económica, de una biorefinería que produzca bioetanol combustible a partir de desperdicios generados en el campo cañero y en los ingenios de caña de azúcar, se evaluó la opción real de abandono de operaciones para determinar la factibilidad económica. Así como, determinar los factores económicos que más afectan la rentabilidad de una biorefinería ante posibles cambios. En función de los resultados se podrán generar políticas públicas orientadas a incentivar la producción de bioetanol de segunda generación de manera sustentable en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología para la evaluación tradicional está basada en la desarrollada por Humbird *et al.* (2011), la cual está enfocada en la evaluación económica de biorefinerías de bioetanol de segunda generación y respaldada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) de Estados Unidos. En el caso de las opciones reales se calculará a partir de la metodología de Mun (2002).

Análisis de Precios

Se tomó como referencia los precios del bioetanol publicados en USDA (2016), de 1996 a 2014, se ajustaron de acuerdo con una fórmula de precios establecida por PEMEX (2015b), los cuales toman en cuenta los precios del bioetanol importado, costos de importación, y costos de distribución para las Terminales de Almacenamiento y Reparto de Veracruz (TAR) de PEMEX. Todos los costos y precios tomaron como base el año 2014.

Ubicación

Se tiene el supuesto que la biorefinería se instalaría adyacente al ingenio azucarero San Cristóbal, ubicado en el municipio de Carlos A. Carrillo, Veracruz (Figura 1), dicha selección obedeció a que es el ingenio que mayor volumen de caña de azúcar procesa en

the profitability of a biorefinery in face of possible changes. In function of the results, public policies could be generated to promote sustainable second generation bioethanol production in Mexico.

MATERIALS AND METHODS

The methodology for traditional evaluation is based on the one developed by Humbird *et al.* (2011), which is focused on the economic evaluation of second generation bioethanol biorefineries and backed by the United States National Renewable Energy Laboratory (NREL). In the case of real options valuation, it will be calculated based on the methodology by Mun (2002).

Price Analysis

The prices of bioethanol published in USDA (2016) from 1996 to 2014 were taken as reference, and they were adjusted in accordance to a price formula established by PEMEX (2015b), which takes into account the prices of imported bioethanol, importation costs, and distribution costs for PEMEX's Storage and Distribution Stations (*Terminales de Almacenamiento y Reparto*, TAR) in Veracruz. All the costs and prices were taken based on 2014.

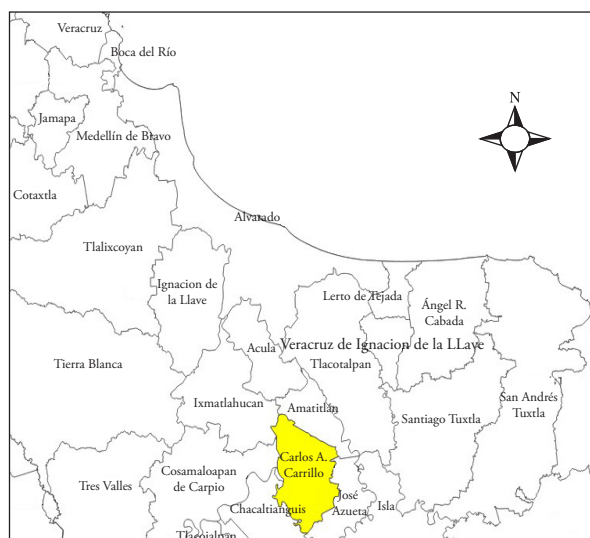


Figura 1. Ubicación de Municipio de Carlos A. Carrillo en el estado de Veracruz.

Figure 1. Location of the Municipality of Carlos A. Carrillo in the state of Veracruz.

México, en la zafra 2013-2014 cosechó un volumen de 2 387 596 toneladas (CONADESUCA, 2015).

Materia prima

Se estimó que el desperdicio de la caña de azúcar provendría de dos fuentes, una es la biomasa que se genera en el campo cañero después de cosechar la caña de azúcar, puntas y hojas de la caña, pues se supondrá que durante la cosecha no habrá quemaduras y será mecanizada y la otra fuente provendría del bagazo de caña sobrante del ingenio azucarero, el cual ya no tiene un uso inmediato.

Las cifras de volumen de biomasa susceptibles de aprovechar toman como base las estadísticas del Ingenio San Cristóbal de 5 años, 2010 a 2014, la información proviene de CONADESUCA (2015). Los coeficientes de biomasa generada se toman de Salgado-García *et al.* (2014).

Condiciones de proceso

La biorefinería tendrá un proceso conocido como pretratamiento con ácido diluido y de hidrólisis enzimática, las condiciones de proceso se tomaron como base una biorefinería de bioetanol celulósico en Brasil (Seabra, 2010). Las actividades de procesamiento básicas son: pretratamiento, acondicionamiento, sacarificación, fermentación, producción de enzimas, destilación, almacenamiento, recuperación de sólidos, tratamiento de aguas y generación de energía. La biorefinería producirá su propia energía (electricidad y vapor), mediante un sistema de cogeneración (caldera y turbo-generador de vapor). Del volumen anual de energía eléctrica generada, un porcentaje sería para autoconsumo (53%) y el otro excedente (47%) se vendería a CFE. Se tendrá un consumo de 5.4 litros de agua por un litro de bioetanol producido, Humbird *et al.* (2011). El rendimiento de la biomasa será de 370 litros de bioetanol por tonelada de biomasa procesada (Seabra, 2011).

Evaluación Económica

El modelo de evaluación económica consistió de varias etapas: La estimación de la inversión total del proyecto, la estimación de los costos de operación, el cálculo del flujo descontado, cálculo de indicadores de rentabilidad, un análisis de sensibilidad y opciones

Location

There is the assumption that the biorefinery would be installed next to the sugar factory San Cristóbal, located in the municipality of Carlos A. Carrillo, Veracruz (see Figure 1). This selection responded to it being the sugar factory that produces the highest volume of processed sugarcane in Mexico, during the 2013-2014 sugar harvest with a volume of 2 387 596 tons (CONADESUCA, 2015).

Prime Material

It was estimated that the sugarcane waste would come from two sources, one is the biomass generated in the sugar field after harvesting the sugarcane, and its tips and leaves, since it is assumed that during the harvest there will be no fires and it will be mechanized and that the other source would come from surplus sugarcane bagasse from the sugar factory, which no longer has an immediate use.

The figures of susceptible biomass volume to be used are based on statistics from the San Cristóbal Sugar Factory of 5 years, 2010 to 2014, and the information comes from CONADESUCA (2015). The biomass coefficients generated are taken from Salgado-García *et al.* (2014).

Processing Conditions

The biorefinery will have a process known as pretreatment with diluted acid and of enzymatic hydrolysis, and the processing conditions used as reference are from a cellulose bioethanol biorefinery in Brazil (Seabra, 2010). The basic processing activities are: pretreatment, outfitting, saccharification, fermentation, enzyme production, distillation, storage, recovery of solids, water treatment, and energy generation. The biorefinery will produce its own energy (electricity and vapor), through a cogeneration system (steam boiler and turbine). From the annual volume of electric energy generated, a percentage would be for auto-consumption (53%) and the other surplus (47%) would be sold to CFE. There would be a consumption of 5.4 liters of water per liter of bioethanol produced (Humbird *et al.*, 2011). The biomass yield will be of 370 liters of bioethanol per ton of biomass processed (Seabra, 2011).

reales. Todos los valores económicos están expresados en valores constantes del año 2014 en USD y se toma como referencia una paridad de MXN 14.80 por dólar (Banco de México, 2016).

Inversión total del proyecto

La Inversión Total del Proyecto (TCI) incluye la Inversión Directa (TDC), esta inversión tiene que ver con maquinaria, equipo, infraestructura operativa y la Inversión Indirecta (TIC), la cual tiene que ver con instalación de la maquinaria, equipo, renta de maquinaria, gastos de ingeniería, imprevistos, capital de trabajo, etcétera.

La inversión total del proyecto es muy difícil de precisar a detalle, por eso a nivel de estudios de factibilidad económica de proyectos de inversión grandes, dada su complejidad, se hacen estimados generales y no detallados de acuerdo a proyectos similares ya evaluados (Behrens y Hawranek, 1991). En el caso de la evaluación económica de biorefinerías de bioetanol de segunda generación, se pudo observar dicha práctica en Seabra *et al.* (2010) y Humbird *et al.* (2011) y, en la que se emplean estimados aproximados para calcular muchos conceptos de inversión.

Inversión directa

Su cálculo se basó en Humbird *et al.* (2011), en donde se da un listado muy completo de importes de maquinaria y equipo. A cada uno de estos importes se le ajustó su valor de acuerdo a un factor de escala.

Otros conceptos de inversión directa son los relacionados con la infraestructura operativa los cuales se estimaron de acuerdo con el valor de la inversión directa de maquinaria, equipo de procesamiento y cierto valor porcentual. El 4% para inventario de refacciones de maquinaria, equipo y suministros, 9% para infraestructura de obra civil de las instalaciones, 4.5% para sistema de tuberías para conectar áreas de proceso con áreas de soporte. Se comprará un predio de 16 hectáreas, cercano al Ingenio de San Cristóbal, se consideró un valor de USD 8.2 por m², basado en Bancomext (2007).

Inversión indirecta

El cálculo de la TIC, implicó diferentes conceptos: 10% de la TDC para pagos a contratistas por la

Economic Evaluation

The economic evaluation model consisted of several stages: estimating the total investment of the project, estimating the operation costs, calculating the flow discounted, calculating profitability indicators, analyzing sensitivity and real options. All the economic values are expressed in constant values of year 2014 in USD, and a parity of 14.80 MX pesos per dollar is taken as reference (Banco de México, 2016).

Total Investment of the Project

The Total Investment of the Project (TCI) includes the Direct Investment (TDC), and this investment is related to machinery, equipment, operative infrastructure and Indirect Investment (TIC)⁴, which has to do with machinery installation, equipment, machinery rental, engineering expenses, unforeseen expenses, working capital, etc.

The total investment of the project is very difficult to specify in detail, which is why studies for large investment projects at the level of economic feasibility are made based on similar projects that have already been evaluated, given their complexity, general and undetailed estimates (Behrens and Hawranek, 1991). In the case of the economic evaluation of second generation bioethanol biorefineries, this practice could be obtained Seabra *et al.* (2010) and Humbird *et al.* (2011), where approximate estimates are used to calculate many investment concepts.

Direct Investment

Its calculation was based on Humbird *et al.* (2011), where there is a very complete list of machinery and equipment costs. Each of these costs is adjusted to a value according to a scale factor.

Other direct investment concepts are those related to the operational infrastructure, which are estimated according to the direct investment value of machinery, processing equipment and certain percentage value. For the inventory of machinery replacement parts, equipment and supplies, 4%; for infrastructure of civil works of the facilities, 9%; and 4.5% for the piping system to connect processing areas with support areas. A plot of 16 hectares will be

instalación de la maquinaria y equipo. El 10% de la TDC para gastos generales de campo por renta de equipo menor, servicios de campo, supervisión en campo, construcciones temporales durante la instalación; 20% de la TDC para gastos de ingeniería y construcción; 10% de la TDC para gastos generales del proyecto por fletes de internación de maquinaria importada, permisos, seguros, vehículos, impuestos, etcétera; 10% de TDC para gastos imprevistos del proyecto por situaciones no previstas durante la construcción de obra civil, instalación de maquinaria y equipo, etcétera; y 10% de TDC para capital de trabajo.

Costo unitario de producción

Los costos unitarios contemplan los costos variables de producción (CVP), aquellos que cambian con el volumen de producción y los costos fijos de producción (CFP), aquellos que se erogan mensualmente, exista o no producción, la unidad de costo está dada en USD por litro de bioetanol celulósico.

Costos variables de producción

Los costos variables incluyen: costo de desperdicio en campo cañero y costo de bagazo de caña USD 15/ton, de acuerdo a Seabra (2010); costo de electricidad generada USD 0.11/kwh, se tomó como base tarifa de consumidor industrial región central de CFE (2014); costo de agua USD 0.11/m³, de acuerdo a la tarifa que tiene que ver con la zona de disponibilidad 4, donde se encuentra ubicado el municipio de Carlos A. Carrillo (CONAGUA,2014); costo de químicos USD 0.03/lit de bioetanol, se tomó como base los reportado por Humbird *et al.* (2011), pero se les aplicó un factor de inflación acumulado de 1.164 de acuerdo a inflación en USA de 2007 a 2014 (INEGI, 2015).

Costos fijos de producción

Los costos fijos incluyen: costo operativo USD 0.042/lit bioetanol, costo administrativo USD 0.016/lit bioetanol y depreciación USD 0.072/lit bioetanol, basado en Humbird *et al.* (2011).

Flujo de efectivo descontado

Para su cálculo se empleó la siguiente fórmula, Mun (2002):

purchased, near to the San Cristóbal Sugar Factory, with a value of USD 8.2 per m² considered, based on Bancomext (2007).

Indirect Investment

Calculating the TIC implied different concepts: 10% of the TDC for payments to contractors for the installation of machinery and equipment. Of the TDC, 10% was used for general field expenses for the rental of minor equipment, field services, field supervision, temporary constructions, during the installation; 20% of the TDC for engineering and construction expenses; 10% of the TDC for general expenses of the project from freights of imported machinery, permits, insurance, vehicles, taxes, etc.; 10% of the TDC for unforeseen project expenses from unforeseen situations during the construction work, installation of machinery and equipment, etc.; and 10% of the TDC for working capital.

Unitary Production Cost

The unitary costs contemplate variable production costs (CVP), those that change with the production volume; and fixed production costs (CFP), those that are spent monthly, whether there is production or not. The unit cost is given in USD per liter of cellulose bioethanol.

Variable Production Costs

The variable costs include: cost of waste in the sugarcane field and cost of sugarcane bagasse USD 15/ton, according to Seabra (2010); cost of electricity generated USD 0.11/kwh, based on the rate of the CFE central region industrial consumer (2014); cost of water USD 0.11/m³, according to the rate that is related to availability zone 4, where the municipality of Carlos A. Carrillo (CONAGUA,2014) is located; cost of chemicals USD 0.03/l of bioethanol, based on those reported by Humbird *et al.*(2011), although an accumulated inflation factor of 1.164 was applied based on inflation in the US from 2007 to 2014 (INEGI, 2015).

Fixed Production Costs

The fixed costs include: operational cost USD 0.042/l bioethanol, administrative cost USD

$$FED = Ven - CPro - Dep - \frac{Imp}{1+i} - \frac{Fdes}{1+i} \quad (1)$$

donde *FED*: flujo de efectivo descontado, *Ven*: ventas, *CPro*: costo de producción, *Dep*: depreciación, *Imp*: impuestos, *Fdes*: Factor de descuento.

La anualidad del pago de préstamo se calcula con la siguiente formula (Hodson, 1996):

$$A = K \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (2)$$

donde *A*: anualidad en USD, *K*: monto de préstamo solicitado en USD, *i*: tasa de interés préstamo, *n*: número de años a pagar.

Indicadores de rentabilidad

Se calculó el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Rendimiento (TIR), y la Relación Beneficio Costo (B/C).

La ecuación para calcular el VAN, Weston y Brigham (1993), es la siguiente:

$$VAN = \sum_{i=0}^n \frac{FE_i}{(1+r)^i} \quad (3)$$

donde *VAN*: valor actual neto, *FE*: flujo neto de efectivo; *r*: tasa de descuento, *n*: número de periodos, *i*: periodo.

La ecuación para calcular el TIR, Weston y Brigham (1993), es la siguiente:

$$\sum_{i=0}^n \frac{FE_i}{(1+TIR)^i} \quad (4)$$

donde *FNE*: flujo neto de efectivo, *TIR*: tasa interna de rendimiento, *n*: número de periodos, *i*: periodo.

La ecuación para calcular la relación B/C (Hodson, 1996), es la siguiente:

0.016/l bioethanol, and depreciation USD 0.072/l bioethanol, based on Humbird *et al.* (2011).

Discounted Effective Flow

The following formula was used for its calculation (Mun, 2002):

$$FED = Ven - CPro - Dep - \frac{Imp}{1+i} - \frac{Fdes}{1+i} \quad (1)$$

where *FED*: discounted effective flow, *Ven*: sales, *CPro*: production cost, *Dep*: depreciation, *Imp*: taxes, *Fdes*: Discount factor.

The annual loan payment is calculated with the following formula (Hodson, 1996):

$$A = K \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (2)$$

where *A*: annuity in USD, *K*: amount of loan requested in USD, *i*: loan interest rate, *n*= number of years to pay.

Profitability Indicators

The Net Present Value (VAN), Internal Rate of Return (TIR), and Benefit-Cost Ratio (B/C) were calculated.

The equation to calculate the VAN, Weston and Brigham (1993), is the following:

$$VAN = \sum_{i=0}^n \frac{FE_i}{(1+r)^i} \quad (3)$$

where *VAN*: net present value, *FE*: net cash flow, *r*: discount rate, *n*: number of periods, *i*: period.

The equation to calculate TIR, Weston and Brigham (1993), is the following:

$$\sum_{i=0}^n \frac{FE_i}{(1+TIR)^i} \quad (4)$$

$$B / C = \frac{\sum_{i=0}^n FI_i}{\sum_{i=0}^n FS_i} \quad (5)$$

donde: *B*: beneficio, *C*: costo, *FI*: flujo de ingreso descontado, *FS*: flujo de egreso descontado, *n*: número de periodos, *i*: periodo.

Análisis de Sensibilidad

Se evaluó el VAN con algunas variables consideradas como críticas: volumen de producción anual, precio de venta, costo unitario de producción, nivel de apalancamiento, tasa de interés de préstamo, tasa de descuento y el rendimiento de la biomasa para convertirse en bioetanol. Para cada variable se tendrá el caso base, el mejor caso (aumento de 20%) y el peor caso (reducción de 20%).

Opciones reales

Se utilizó la técnica de árboles binomiales las cuales es una de las técnicas más empleadas para resolver problemas de opciones reales, la cual sigue la metodología de Mun (2002).

Las tasas continuas de movimiento de los precios reales de bioetanol se determinaron con la ecuación:

$$rt = \ln \left[(P_{t1}) (P_{t0})^{-1} \right] \quad (6)$$

donde *rt*: tasa continua de movimiento, *ln*: logaritmo natural, *P_{t1}*: precio real en el periodo *t*, *P_{t0}*: Precio real en el periodo anterior.

Una vez obtenida las tasas continuas de cada año de la serie de precios de bioetanol se determina la desviación estándar de la serie, la cual nos permite obtener la volatilidad o tasa de riesgo del precio (*Γ*). El valor del proyecto en un escenario de volatilidad puede aumentar, disminuir o mantenerse igual en el tiempo. El movimiento de ese valor se estima con base en la tasa de riesgo del precio del producto:

$$u = e^{\Gamma(\delta t)^{0.5}} \quad (7)$$

$$u = e^{-\Gamma(\delta t)^{0.5}} \quad (8)$$

where *FNE*: net cash flow, *TIR*: internal rate of return, *n*: number of periods, *i*: period.

The equation to calculate the B/C ratio (Hodson, 1996), is the following:

$$B / C = \frac{\sum_{i=0}^n FI_i}{\sum_{i=0}^n FS_i} \quad (5)$$

where *B*: benefit, *C*: cost, *FI*: discounted income flow, *FS*: discounted expenditure flow, *n*: number of periods, *i*: period.

Sensitivity Analysis

VAN was evaluated with some variables considered as critical: annual production volume, sale price, unitary production cost, level of leverage, loan interest rate, discount rate, and biomass yield to be turned into bioethanol. For each variable there will be the base case, the best case (increase of 20%) and the worst case (reduction of 20%).

Real Options

The binomial trees technique was used, which is one of the most frequently used techniques to solve real options problems, following the methodology by Mun (2002).

The continuous movement rates of real prices of bioethanol were determined with the equation:

$$rt = \ln \left[(P_{t1}) (P_{t0})^{-1} \right] \quad (6)$$

where *rt*: continuous movement rate, *ln*: natural logarithm, *P_{t1}*: real price in period *t*, *P_{t0}*: real price in the previous period.

Once the continuous rates of each year of the series of bioethanol prices were obtained, the standard deviation of the series is determined, which allow us to obtain the volatility or risk rate of the price (*Γ*). The project value in a scenario of volatility can increase, decrease or remain the same in time. The movement of this value is estimated based on the risk rate of the price of the product:

donde u : factor que aumenta el valor del proyecto, d : factor que disminuye el valor del proyecto, Γ : tasa de riesgo del precio, δt : intervalo de tiempo entre ramas.

El valor del proyecto al aumentar (u) o disminuir (d) en el tiempo forma un árbol de decisiones, (Figura 2).

El valor del proyecto puede aumentar o disminuir, la probabilidad de que esto ocurra:

$$p = \left[e^{(r)(\delta t)} - d \right] (u - d)^{-1} \quad (9)$$

donde p : probabilidad de que aumente el valor del proyecto, u : aumenta el valor del proyecto, d : disminuye el valor del proyecto, r : tasa libre de riesgo, δt : intervalo de tiempo entre ramas.

Una vez que se tienen todos los nodos con su valor calculado de acuerdo al horizonte de tiempo (años), se hace un análisis regresivo, para cada opción seleccionada, en nuestro caso se eligió evaluar una opción de abandono, para 5, 10, 15, 20 y 25 años. Los nodos finales se evalúan de acuerdo al valor mayor que resulte de comparar el valor calculado y el valor del rescate por ejercer la opción de abandono, en el año seleccionado, para evaluar los nodos intermedios se empleó la siguiente formula:

$$V_{ant} = \left[p(Vu) + (1-p)(Vd) \right] \left[e^{-(r)(\delta t)} \right] \quad (10)$$

donde V_{ant} : valor nodo precedente, p : probabilidad de que aumente el valor del proyecto, Vu : Valor del nodo que aumento su valor, Vd : Valor del nodo que disminuyo su valor, r : tasa libre de riesgo, δt : intervalo de tiempo entre ramas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los precios del bioetanol anhidro tomaron como base el año 2014, el precio que se empleó para el cálculo del VAN tradicional fue USD 0.70/litro, que corresponde al año de 2014. Además, se hicieron cálculos para encontrar la tasa de riesgo (Γ), la cual se utilizó en la evaluación de opciones reales, (Cuadro 1).

Se estimó un volumen potencial promedio anual de biomasa, con base en estadísticas pasadas del Ingenio San Cristóbal y otros supuestos, (Cuadro 2).

De acuerdo con el volumen estimado de materia prima biomásica, se pudieron definir las condiciones

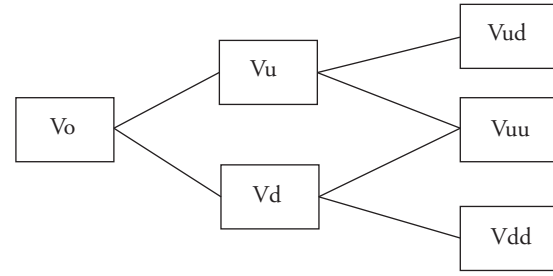


Figura 2. Árboles de decisiones, Brambila *et al.* (2013).
Figure 2. Decision tree, Brambila *et al.* (2013).

$$u = e^{\Gamma(\delta t)^{0.5}} \quad (7)$$

$$u = e^{-\Gamma(\delta t)^{0.5}} \quad (8)$$

where u : factor that increases the value of the project, d : factor that decreases the value of the project, Γ : risk rate of the price, δt : time interval between branches.

The value of the project when increasing (u) or decreasing (d) in time shapes a decision tree, see Figure 2.

The value of the project can increase or decrease, the probability of this happening is:

$$p = \left[e^{(r)(\delta t)} - d \right] (u - d)^{-1} \quad (9)$$

where p : probability for the project value to increase, u : increases the project value, d : decreases the project value, r : free risk rate, δt : time interval between branches.

Once all the nodes are obtained with their value calculated according to the time horizon (years), a regressive analysis is made for each option selected, in our case it was chosen to evaluate an option of abandonment, for 5, 10, 15, 20 and 25 years. The final nodes are evaluated according to the highest value that results from comparing the calculated value and the rescue value after applying the abandonment option, in the year selected. To evaluate the intermediate nodes the following formula was used:

$$V_{ant} = \left[p(Vu) + (1-p)(Vd) \right] \left[e^{-(r)(\delta t)} \right] \quad (10)$$

where V_{ant} : preceding node value, p : probability for the project value to increase, Vu : value of the node

Cuadro 1. Precio real de bioetanol anhidro.

Table 1. Real price of anhydrous bioethanol.

| Año | Precio bioetanol (USD/lit) | Tasa movimiento discreto | Tasa movimiento continuo |
|------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1996 | 0.60 | | |
| 1997 | 0.50 | 0.8436 | -0.1701 |
| 1998 | 0.46 | 0.9104 | -0.0938 |
| 1999 | 0.43 | 0.9275 | -0.0753 |
| 2000 | 0.56 | 1.3141 | 0.2731 |
| 2001 | 0.59 | 1.0608 | 0.0590 |
| 2002 | 0.45 | 0.7608 | -0.2734 |
| 2003 | 0.53 | 1.1690 | 0.1561 |
| 2004 | 0.64 | 1.2109 | 0.1914 |
| 2005 | 0.66 | 1.0343 | 0.0337 |
| 2006 | 0.90 | 1.3682 | 0.3135 |
| 2007 | 0.77 | 0.8533 | -0.1587 |
| 2008 | 0.82 | 1.0686 | 0.0663 |
| 2009 | 0.59 | 0.7105 | -0.3418 |
| 2010 | 0.63 | 1.0770 | 0.0741 |
| 2011 | 0.86 | 1.3578 | 0.3058 |
| 2012 | 0.73 | 0.8557 | -0.1558 |
| 2013 | 0.75 | 1.0181 | 0.0179 |
| 2014 | 0.70 | 0.9390 | -0.0629 |
| | | $\Gamma =$ | 0.1924 |

Fuente: elaborado con información obtenida de PEMEX (2015b) y USDA (2016). ♦ Source: Elaborated with information obtained from PEMEX (2015b) and USDA (2016).

de operación básicas para producir bioetanol en la biorefinería, (Cuadro 3).

La inversión requerida para poner en marcha este proyecto es del orden de 302 millones de dólares. El costo unitario de producción obtenido fue de USD 0.42 por litro, que resultó de sumar el costo unitario variable de USD 0.29 por litro, más costo fijo unitario de USD 0.13 por litro.

Los parámetros que se utilizaron para el cálculo de análisis económico se muestran en el Cuadro 4. Los resultados de la evaluación económica de las diferentes opciones se presentan en el Cuadro 5. Por otra

that increased its value, V_d : value of the node that decreased its value, r : free risk rate, δt : time interval between branches.

RESULTS AND DISCUSSION

The prices of anhydrous bioethanol took as a base the year 2014; the price used for calculation of the traditional VAN was USD 0.70/liter, which corresponds to the year 2014. In addition, calculations were made to find the risk rate (Γ), which was used in the evaluation of real options (see Table 1).

Cuadro 2. Biomasa potencial de ser aprovechada en biorefinería.

Table 2. Potential biomass to be exploited in biorefinery.

| Superficie cosechada (ha) [†] | Caña molida (ton) [†] | Biomasa campo (ton) [‡] | Bagazo (ton) [†] | Biomasa total (ton) | Rendimiento biomasa (lt/ton) [§] | Bioetanol estimado (lt) |
|--|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------|---|-------------------------|
| 40 822 | 2 229 855 | 367 400 | 18 257 | 385 657 | 370 | 142 693 090 |

[†]Datos promedio 2010 a 2014 del Ingenio San Cristóbal en Veracruz, CONADESUCA (2015). [‡]Se multiplico superficie por 9 ton/ha. [§]Average data 2010 to 2014 from the San Cristóbal Sugar Factory in Veracruz, CONADESUCA (2015). [†]Surface was multiplied by 9 ton/ha.

Fuente: basado en Salgado-García *et al.* (2014). [§]Seabra (2011). ♦ Source: Based on Salgado-García *et al.* (2014). [§]: Seabra (2011).

Cuadro 3. Parámetros de operación de biorefinería.**Table 3.** Operation parameters of biorefinery.

| Parámetro | Unidad | Cantidad |
|---|---------|-------------|
| Procesamiento de biomasa | ton/año | 386 000 |
| Días efectivos de trabajo ^b | día/año | 350 |
| Horas efectivas de trabajo | hr /año | 8400 |
| Rendimiento de biomasa | lt/ton | 370 |
| Producción de bioetanol anual | lt/año | 143 000 000 |
| Energía eléctrica generada ^b | kwh/año | 150 150 000 |
| Energía eléctrica auto consumida ^b | kwh/año | 79 579 500 |
| Energía eléctrica excedente ^b | kwh/año | 70 570 500 |
| Agua consumida/m ³ /año ^c | kwh/año | 772 200 |

^bSeabra (2008). ^cHumbird *et al.* (2011).

Fuente: elaboración propia. ♦ Source: prepared by authors.

parte, se evaluó el cambio del VAN, aplicando un cambio de $\pm 20\%$ en algunas variables consideradas como críticas (Figura 3). Se observa que la variable que más afecta el VAN sería por un cambio de precios del bioetanol, seguida por un cambio en rendimiento de la biomasa estimada y en tercer lugar por un cambio en la tasa de descuento.

Maung y Gustafson (2011), hicieron un estudio de viabilidad económica para la producción de bioetanol de primera generación a partir de remolacha azucarera llegaron a una conclusión similar.

Por otra parte, en el análisis de factibilidad de un proyecto se pueden tratar diferentes aspectos, como

A potential average annual volume of biomass was estimated, based on past statistics from the San Cristóbal Sugar Factory and other assumptions (see Table 2).

The conditions of basic operations to produce bioethanol in the biorefinery could be defined according to the estimated volume of biomass prime material (see Table 3).

The investment required to implement this project is in the order of 302 million dollars. The unitary production cost obtained was USD 0.42 per liter, which resulted from adding the variable unitary cost of USD 0.29 per liter, plus the unitary cost of USD 0.13 per liter.

Cuadro 4. Parámetros para cálculo de flujo de efectivo descontado (FED).**Table 4.** Parameters to calculate the discounted cash flow (FED).

| Concepto | unidad | Valor |
|---|-------------|-------------|
| Vida útil del proyecto | Año | 30 |
| Inversión total del proyecto | USD | 308 407 671 |
| Inversión patrimonial (40%) | USD | 123 363 068 |
| Monto de Préstamo (60%) | USD | 185 044 603 |
| Plazo de préstamo | año | 10 |
| Tasa de préstamo | % | 8 |
| Anualidad | USD | 27 577 102 |
| Capital de trabajo | USD | 15 420 384 |
| Ventas | USD/año | 107 786 755 |
| Costo de producción | USD/año | 48 414 383 |
| Depreciación caldera y turbogenerador (1 año) | USD/año | 49 042 507 |
| Depreciación caldera y turbogenerador (10 años) | USD/10 años | 25 936 516 |
| ISR | % | 30 |
| Tasa de descuento | % | 10 |

Fuente: elaboración propia basada en Seabra (2010) y Humbird *et al.* (2011). ♦ Source: Prepared by authors based on Seabra (2010) and Humbird *et al.* (2011).

Cuadro 5. Resumen de la evaluación económica .

Table 5. Summary of the economic evaluation.

| Concepto | 5 años ^b | 10 años ^b | 15 años ^b | 20 años ^b | 25 años ^b | 30 años ^s |
|----------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <i>rl</i> | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | |
| Γ | 0.192 | 0.192 | 0.192 | 0.192 | 0.192 | |
| <i>u</i> | 1.212 | 1.313 | 1.395 | 1.469 | 1.538 | |
| <i>d</i> | 0.825 | 0.762 | 0.717 | 0.681 | 0.650 | |
| <i>p</i> | 0.640 | 0.706 | 0.763 | 0.816 | 0.868 | |
| 1- <i>p</i> | 0.360 | 0.294 | 0.237 | 0.184 | 0.132 | |
| Valor rescate [†] | 78.667 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Inversión [†] | (166.809) | (169.359) | (170.988) | (172.479) | (173.405) | (172.479) |
| FED Opción [†] | 55.381 | 119.124 | 169.029 | 199.799 | 218.417 | 233.609 |
| FED Base [†] | 8.353 | 119.345 | 168.819 | 199.538 | 218.613 | 233.548 |
| VAN Total [†] | (111.428) | (50.234) | (1.959) | 27.319 | 45.012 | 61.130 |
| TIR | | | | | | 13.11% |
| B/C | | | | | | 1.35 |

[†]Cifras en millones USD. ^bOpción real. ^sEvaluación tradicional. ♦ [†]Figures in millions USD. ^bReal option. ^sTraditional evaluation. FED: flujo de efectivo descontado. ♦ FED: discounted cash flow. Fuente: elaboración propia basada en Mun (2002). ♦ Source: prepared by authors based on Mun (2002).

son técnico, económico, organizacional, ambiental, y social. En el presente trabajo se tomaron básicamente aspectos económicos y técnicos. Por lo tanto, las evaluaciones técnico-económicas de un proyecto están limitadas, pues su enfoque no toma en cuenta otros aspectos, como el ambiental, tema de mucha relevancia hoy en día, por aquello del cambio climático. Por ejemplo, se han reportado que el bioetanol aumenta la cantidad de los precursores de ozono en la atmósfera que luego se convierten en ozono (Salvo y Geiger, 2014). Incluso, las biorefinerías también emiten gases efecto invernadero (Wang *et al.*, 2007). Existen diferentes opiniones respecto a cuál sería el impacto

The parameters that were used to calculate the economic analysis are shown in Table 4.

Results from the economic evaluation of the different options are presented in Table 5. On the other hand, the change in VAN was evaluated, applying a change of $\pm 20\%$ in some variables considered as critical (see Figure 3). It is observed that the variable that affects VAN most would be from a change in bioethanol prices, followed by a change in yield of the biomass estimated and in third place by a change in the discount rate.

Maung and Gustafson (2011) carried out an economic viability study for first generation

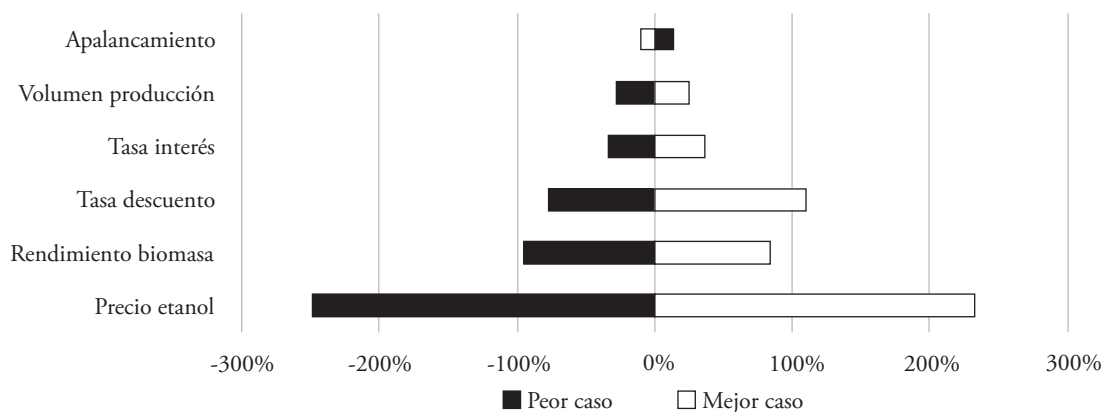


Figura 3. Cambio (%) del VAN en caso base, bajo otras condiciones.
Figure 3. Change (%) of VAN in the base case, under different conditions.

ambiental de realizar la mezcla de los biocombustibles con la gasolina, y no existe todavía ninguna investigación empírica en México, que dé certidumbre sobre el tema, lo cual dificulta la toma de decisiones bien fundamentadas. A pesar de esto, en México se le hizo una modificación a la NOM 16, que se refiere a la calidad de los combustibles, la cual establece un máximo de 10% de bioetanol para mezclarse con la gasolina, pero se prohíbe la mezcla de bioetanol con la gasolina en las tres zonas metropolitanas más grandes de la República Mexicana, Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey (DOF, 2017).

CONCLUSIONES

De acuerdo con los indicadores económicos calculados, se puede decir que una biorefinería de bioetanol de segunda generación, a partir de los desperdicios de la caña de azúcar, sería factible económicamente en México, a mediano plazo, bajo ciertas condiciones. El factor que pudiera afectar más la rentabilidad económica de una biorefinería de este tipo, ante un cambio de condiciones técnicas y económicas, sería el precio del bioetanol, pues fue la variable que más afectó el valor del VAN, ante cambios favorables y desfavorables. Caso contrario fue el tamaño de la biorefinería. Los resultados logrados podrían dar origen a futuras investigaciones, como la de poder determinar cuál es el tamaño mínimo para que una planta de bioetanol celulósico pueda ser factible, tanto técnica como económicamente, no solo con desperdicios de caña de azúcar, sino de otros cultivos como el del sorgo dulce y del trigo. Además, podrían motivar al gobierno mexicano, a que se generen políticas públicas para que incentive la producción de bioetanol de segunda generación a mediano plazo, pues las condiciones están dadas: existe un marco regulatorio favorable para explotar los biocombustibles, ya empieza a madurar la tecnología a nivel mundial para producir bioetanol a partir de la biomasa; en México se tienen grandes cantidades de residuos agrícolas sin aprovechar cabalmente, en detrimento de las zonas rurales, que están necesitadas de desarrollo económico y por último mencionar, que se tiene un nivel creciente de importaciones de gasolina, lo que origina una balanza económica desfavorable para la nación. Es necesario que en México se hagan investigaciones empíricas del efecto ambiental negativo que pudiera

bioethanol production from sugar beet, which reached a similar conclusion.

On the other hand, in the feasibility analysis of a project, different aspects can be addressed, such as the technical, economic, organizational, environmental, and social. In this study, the economic and technical aspects were basically taken. Therefore, the technical-economic evaluations of a project are limited, because their approach does not take into account other aspects, such as the environmental, theme of great relevance today, due to climate change. For example, it has been reported that bioethanol increases the amount of ozone precursors in the atmosphere that then become ozone (Salvo and Geiger, 2014). In fact, biorefineries also emit greenhouse effect gases (Wang *et al.*, 2007). There are different opinions regarding what would be the environmental impact of mixing biofuels and gasoline, and there is still no empirical research in Mexico that gives certainty about the issue, which turns making well-founded decisions difficult. Despite this, a modification was made to NOM 16 in Mexico, which refers to the quality of the fuels, establishing a maximum of 10% of bioethanol to be mixed with gasoline, although mixing bioethanol with gasoline is prohibited in the three largest metropolitan areas in Mexico: Mexico City, Guadalajara and Monterrey (DOF, 2017).

CONCLUSIONS

According to the economic indicators calculated, it can be said that a second generation bioethanol biorefinery, based on sugarcane wastes, would be economically feasible in the medium term, under certain conditions. The factor that could affect most the economic profitability of a biorefinery of this type, in face of a change in technical and economic conditions, would be the price of bioethanol, since it was the variable that affected most the VAN, with favorable or unfavorable changes. The contrary case was the size of the biorefinery. The results achieved could originate future research, such as being able to determine the minimum size for a cellulose bioethanol plant to be feasible, both technically and economically, not just with sugarcane wastes, but also other crops like sweet sorghum and wheat. In addition, they could motivate the Mexican government, for public policies to be generated to promote the production of second generation

tener el bioetanol al mezclarse con las gasolinas, en las zonas metropolitanas más importantes de México, para tener una base sólida para la toma de decisiones.

LITERATURA CITADA

Alemán-Nava G, V. H. Casiano-Flores, D. L. Cárdenas-Chávez, R. Díaz-Chávez, N. S., J. F., Dallemand, N., Ornelas-Soto R., and García-Arrazola R. 2015. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Biofuels Bioproducts and Bio-refining*, 9:8–20.

BANCOMEXT (Banco de Comercio Exterior). 2007. *Industrial Cost in México*. México, D. F. 157-175 p.

BANXICO (Banco de México). 2016. Serie histórica diaria del tipo de cambio peso-dólar. <http://www.banxico.org.mx/>.

Behrens, W., y Hawranek, P. M. 1991. *Manual for the preparation of industrial feasibility studies*. United Nations Industrial Development Organization. New York. USA. 13 p.

Brambila, J. J. M., Martínez A., M. Rojas M., M. Pérez R., y V. Pérez. 2013. La bioeconomía, las biorefinerías y las opciones reales: El caso del biobioetanol y el azúcar real. *Agrociencia*. Vol.47, Num.3) pp: 281-292.

CFE. 2014. Consulta tu tarifa. http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp.

CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). 2015. *Balance Mensual de Azúcar*. México. DF. <http://www.infocana.gob.mx.1>

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. *Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materias de aguas nacionales*. Comisión Nacional del Agua. México. DF.

DOE (Department of Energy). 2015. *Lignocellulosic biomass for advanced biofuels and bioproducts*. Office of Biological and Environmental Research. United States. Febrero 2015. 5 p.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2008. *Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*. Publicada el 1 de febrero de 2008. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México. DF.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2017. *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM 016 CRE-2016. CRE (Comisión Reguladora de Energía)*. <http://www.dof.gob.mx>.

Domínguez, C. A. 2008. *Un análisis económico costo-beneficio del bioetanol en México*. Tesis de Maestría en Economía Aplicada. El Colegio de la Frontera Norte. Tijuana, B.C., México 149 p. <http://www.colef.mx/posgrado>.

EBTP (European Biofuels Technology Platform). 2016. *Demonstration and flagship projects on cellulosic ethanol*. <http://biofuelstp.eu/cellulosic-ethanol.html#crescentino>.

EEA (European Environment Agency). 2008. *Annual European Community Greenhouse Gas Inventory 1990–2006 and Inventory Report* Brussels, Belgium. <http://www.eea.europa.eu/>

Fleten, S. E., Boomsa, T. K. y Meade, N. 2012. Renewable energy investments under different support schemes: A real option approach. *European Journal of Operational Research*, 220: 225–237.

Hodson W. 1996. *Maynard manual del ingeniero industrial*. Tomo III. Cuarta Edición. Edit. McGraw Hill.

Humbird, D., R. Davis, L. Tao, C. Kinchin, D. Hsu, A. Aden, P. Schoen, J. Lukas, B. Olthof, M. Worley, D. Sexton, and D. Dudgeon. 2011. *Process Design and Economics for Bioche-*

bioethanol in the medium term, for the conditions are given: there is a favorable regulatory framework to exploit biofuels and the technology to produce bioethanol from biomass is starting to mature worldwide; in Mexico there are large amounts of agricultural residues that are not fully exploited, in detriment of the rural zones, which are in need of economic development. And the last thing to mention: there is an increasing level of gasoline imports, which originates an unfavorable economic balance for the nation. It is necessary for there to be empirical studies performed in Mexico about the negative environmental effect that bioethanol could have when mixed with gasolines, in the most important metropolitan zones in Mexico, to have a solid base for decision making.

NOTAS

⁴All initials based on Spanish terms.

—End of the English version—



mical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol. Technical Report NREL/TP-5100-47764. National Renewable Energy Laboratory. 1617 Cole Boulevard Golden, Colorado 80401. <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/47764.pdf>

IEA (International Energy Agency). 2010. *Sustainable Production of Second Generation Biofuels*. Paris, France. <https://www.iea.org/publications>.

IEA (International Energy Agency). 2014. *CO2 emissions from fuels combustion highlights*. Paris, France. <https://www.iea.org/publications>.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2015. *Banco de Información Económica. Indicadores Internacionales. Tasa de Inflación*. Estados Unidos. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>.

Leduc S. 2009. *Development of an optimization model for the location of biofuel Production plants*. Doctoral Thesis. Division of Energy Engineering Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. Lulea University of Technology. Sweden. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.471.8961&rep=rep1&type=pdf>

Masera, R.O., J. Aguilón, y B. Gamino. 2005. *Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la biomasa como energético renovable en México*. Centro de Investigaciones en Ecosistemas UNAM e Instituto de Ingeniería UNAM. Ciudad Universitaria. México. DF. http://portal.energia.gob.mx/webSener/res/168/A2_Biomasa.pdf

Maung, T. and Gustafson, C. (2011). The economic feasibility of sugar beet biofuel production in Central North Dakota. *Biomass & Bioenergy* 35:3737-3747.

- Mohr, A., and S. Raman. 2013. Lessons from first generation biofuels and implications for the sustainability appraisal of second generation biofuels. *Energy Policy* 63: 114–122.
- Mun, J. 2002. *Real Options Analysis: tools and techniques for valuing strategic investments and decisions*. Wiley finance series. USA. pp: 143-145, 171.
- PEMEX (Petróleos Mexicanos). 2015a. Resultados de licitación para adquisición de bioetanol anhidro. Mexicanos. Boletín de prensa núm. 24. 19/03/2015. www.pemex.com.
- PEMEX (Petróleos Mexicanos). 2015b. Anuario Estadístico 2014. México, DF. www.pemex.com
- REN21. 2017. *Renewables 2017 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat. Paris. France. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf.
- Ruiz, H.A., A. Martínez, and W. Vermerris. 2016. Bioenergy Potential, Energy Crops, and Biofuel Production in Mexico. *Bioenergy and Research* 9:981–984
- Salgado-García, S.; Aranda-Ibáñez, E; Castelán-Estrada, M.; Ortiz-Laurel, H.; Palma-López, D y
- Córdova-Sánchez, S. 2014. Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar. *Revista AgroProductividad*. 7:2.
- Salvo, A., and F. M. Geiger. 2014. Reductions in local ozone levels in urban São Paulo due to a shift from ethanol to gasoline use, *Nature Geoscience*. 43: 4247–4252.
- Seabra, J. E. A., L.T. Chum, and I. H. Macedo. 2010. A techno economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. *Biomass and Bioenergy* 34:1065–1078.
- Seabra, J. E. A., and Macedo I. C. 2011. Comparative analysis for power generation and bioetanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*. 39: 421–428.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales). 2016. Informe de la situación del medio ambiente en México 2015. México, D.F. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314954/Situacion_CC_completo_2015.pdf
- SENER (Secretaría de Economía). 2006. Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México. México. <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36898991>
- SENER (Secretaría de Energía). 2014. Análisis y propuesta para la Introducción de Bioetanol Anhidro en las gasolinas que comercializa PEMEX. México, DF. 69 p. <http://www.bioenergeticos.gob.mx>.
- Sheinbaum Claudia, Ruíz Belizza, and Ozawa Leticia, 2011. Energy consumption and related CO2 emissions in five Latin American countries: Changes from 1990 to 2006 and perspectives. *Energy*, Elsevier, vol. 36(6), pages 3629-3638.
- SIAP (Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera). 2015. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. México, DF. <http://www.siap.gob.mx>.
- UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development). 2012. *Mexico's agriculture development: Perspectives and outlook*. New York. USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2016. www.ers.usda.gov/datafiles/US_Bioenergy/Prices/table14.xls
- Wang, M., M. Wu, and H. Huo. 2007. Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn bioetanol plant types *Environmental Research Letters*. 2: 1-13.
- WBA. 2017. *Global Bioenergy Statistics 2017*. World Bioenergy Association Stockholm, Sweden. https://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017_hq.pdf
- Weston, J. F., and Brigham, E. F. 1993. *Fundamentos de Administración Financiera*. Novena Edición. Editorial McGraw-Hill. México. 1148 p.
- Zabaleta, G. 2014. Evaluación con opciones reales para la instalación de una planta de bioetanol. Tesis de Maestría en Economía. Colegio de Postgraduados. Montecillos. Texcoco. Estado de México. 98 p.