

Factibilidad Económica de la Producción de Etanol a través del Rastrojo de Maíz y Sorgo mediante la aplicación de un modelo matemático.

Economic Feasibility of Ethanol Production through Corn and Sorghum Stubble in spite of the application of a mathematical model.

Luis Alberto Orlandi, Mgtr. Ing.¹, Irma Noemi No, Mgtr. Lic.¹, Adalberto Mario Ascurra, Mgtr. Ing.¹

¹Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Argentina, lorlandi@ingenieria.unlz.edu.ar, ino@ingenieria.unlz.edu.ar, mascorra@gmail.com

Resumen– Los biocombustibles constituyen una de las fuentes más significativas de las energías renovables para las que Argentina posee ventajas comparativas importantes considerando autoabastecimiento y exportación a países industriales con necesidad de mejorar su balance energético, siendo las condiciones de este país adecuadas para desarrollar insumos básicos necesarios para la producción de energía a partir de biomasa. El Bioetanol es un bio-sustituto de los combustibles convencionales, actualmente se obtiene por un proceso de fermentación alcohólica de la caña de azúcar y por hidrólisis con una posterior fermentación del almidón del maíz; siendo esta una materia prima que resta recursos a la industria alimentaria. Teniendo en cuenta esto, se plantea la posibilidad de producir etanol con materia prima que se desecha, generando la obtención de energía sustentable y renovable favoreciendo el cuidado del medio ambiente.

Para esta actividad, se determinó por medio de un modelo matemático (Riggs,1999) la factibilidad económica de la producción de etanol a través del rastrojo de maíz y sorgo, utilizando procesos tecnológicos, teniendo en cuenta datos significativos e índices económicos agroindustriales con los reales de la cantidad de rastrojo disponible en Argentina por región y zona de siembra.

Palabras Clave-- Biocombustibles; Bioetanol lignocelulósico; Producción de Bioetanol; Energías sustentables; Energías renovables; Medio Ambiente; Método de Riggs.

Abstract– Biofuels are one of the most significant sources of renewable energy for which Argentina has significant comparative advantages, considering self-sufficiency, and export to industrial countries in need of improving its energy balance, being the conditions in this country adequate to develop basic inputs necessary for the production of energy from biomass. Bioethanol is a bio-substitute for conventional fuels, it is currently obtained by an alcoholic fermentation process of sugar cane, and by hydrolyzing, with a subsequent fermentation of corn starch, being this, a raw material that reduces resources to the food industry. Taking this into account, the possibility of producing ethanol is raised, with raw material that is discarded, generating the obtaining of sustainable and renewable energy, favoring the care of the environment.

For this activity, the economic feasibility of ethanol production through maize and sorghum stubble, through technological

processes, was determined by means of a mathematical model (Riggs, 1999), taking into account significant data and agricultural economic indices. industrial, with real data on the amount of stubble available in Argentina by region and planting area.

Keywords-- Biofuels; Lignocellulosic bioethanol; Bioethanol production; Sustainable energies; Renewable energy; Environment; Riggs method.

I. INTRODUCCIÓN

La presente publicación se enfoca en el análisis de factibilidad económica de la producción de bioetanol ligno-celulósico a partir de una fuente como el rastrojo de maíz y de sorgo, destacando que con esta cualidad, no se resta recursos a la industria alimentaria, por el contrario, se obtendría una fuente energética sustentable y renovable, contemplando que como todos los vegetales, este tipo de biomasa genera contenido energético a partir de la fotosíntesis, y de este modo se estaría consumiendo energía solar a través de este mecanismo biológico.

A. Situación Problema

Los biocombustibles se presentan como una solución eficiente como respuesta al incremento de la demanda energética a nivel mundial. Argentina posee ventajas comparativas de gran importancia, contemplando autoabastecimiento y posibilidad de exportación a países industriales con escasez de balance energético, envolviendo los compromisos previstos como consecuencia de la ley 26093 que estimula la producción de bioetanol, fijando que todos los combustibles expedidos en Argentina (Gasoil y Naftas) deberían contener mínimo 5% de biocombustibles a partir del año 2013.

En la actualidad, el bioetanol tradicional se obtiene del maíz o la caña de azúcar, compitiendo de modo directo con productos alimenticios, por ello es que se propone partir de

una materia prima que es un desecho (rastrajo de maíz o sorgo), para la obtención de bioetanol.

La producción de etanol a partir de otras fuentes, que no tengan que ver con la sacarosa (caña de azúcar), incrementa los costos unitarios, permitiendo investigar alternativas tecnológicas y productivas a fin de resolver este problema.

La finalidad es analizar y determinar el mercado potencial de bioetanol, junto con la viabilidad económica, para ello se utilizó la siguiente metodología de resolución:

Se determinaron precios y costos de bioetanol, se obtuvieron índices específicos para actualizar los costos por orden de magnitud y en forma temporal, y se realizaron cálculos de variables del mercado para determinar los precios del bioetanol, para concluir obteniendo un modelo matemático a fin de determinar demostrando la viabilidad económica de la obtención de bioetanol lignocelulósico a través del rastrojo de maíz, y sorgo [1].

B. Bioetanol Lignocelulósico

Desde el año 2005 hasta el día de hoy, la demanda de energía en la Argentina se posiciona en constante crecimiento, es por ello que se requiere del incremento y diversificación de la matriz energética, para evitar la dependencia única sobre los combustibles fósiles.

Nos centramos en el estudio de este tipo de bioetanol, con una previa argumentación en relación a los datos de la Cámara de Alcoholes de la República Argentina, que demostró que la remisión de bioetanol (base maíz) superó por primera vez en el año 2014 a las entregas de bioetanol (base caña de azúcar) [1].

C. Proceso de producción bioetanol lignocelulósico

La producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica se basa en el pretratamiento e hidrólisis de la materia prima, para lo cual se presentan tres alternativas: hidrólisis ácida, hidrólisis enzimática y procesos termoquímicos. El pretratamiento tiene como objetivo la desintegración de la matriz de carbohidratos de tal manera que la celulosa reduzca su grado de cristalinidad y aumente la celulosa amorfa, que es la más adecuada para el posterior ataque enzimático. Adicionalmente, la mayor parte de la hemicelulosa se hidroliza durante el pretratamiento y la lignina se libera, o puede incluso descomponerse en algunos casos, con producción de compuestos perjudiciales al proceso fermentativo subsiguiente.

En una etapa posterior, la celulosa liberada es sometida a hidrólisis enzimática, obteniéndose una solución de azúcares fermentables que contiene principalmente glucosa, así como pentosas (xilosas) resultantes de la hidrólisis inicial de la hemicelulosa [2]. Un problema por resolver es disminuir los costos relacionados con la conversión de polisacáridos a azúcares simples. Una opción disponible es la disminución de procesos, como sucede en la sacarificación y fermentación simultánea, donde los dos últimos pasos, hidrólisis enzimática y fermentación, pueden ser combinados en una sola operación que evita el producto final de la inhibición de las enzimas

hidrolíticas y elimina la necesidad de hidrólisis y la fermentación en reactores separados.

La cosecha del rastrojo de maíz para producir bioetanol reduce la cantidad de residuo que es devuelto al suelo, incrementando el riesgo de erosión hídrica y eólica. [1]

II. MÉTODO DE RESOLUCIÓN

La metodología utilizada se funda en el estudio de un caso que se basa en datos significativos e índices económicos de tipo agroindustriales, que fueron aportados por la Facultad de Ciencias Agrarias perteneciente a la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, con datos fácticos referentes a la cantidad de rastrojo disponible en nuestro país, por región y zona donde se siembra el mismo. Estos datos fueron alcanzados por la existencia de bases de datos del laboratorio NIRS (Espectroscopía de Infrarrojo Cercano), en conjunto con indicadores de costos industriales agropecuarios provenientes de bibliografía específica, y de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la República Argentina [3], junto con la Confederación Argentina de Transporte de Cargas, ajustados temporalmente y por orden de magnitud, con objetivo de determinación de costos de producir bioetanol a través de rastrojo del maíz y sorgo [4].

Asimismo, se aplica un modelo matemático que permita determinar la viabilidad económica de obtener bioetanol por medio de esta metodología [5], para así obtener fórmulas y ecuaciones aceptables en función de analizar la realidad y predecir precios, costos y utilidades.

A. Análisis explicativo fórmula de Riggs [5]

Dada la fórmula 1:

$$P = X - y.N \quad (1)$$

Siendo:

P Precio del producto luego de la fabricación (\$)

X Precio del mercado antes de la fabricación (\$)

y Variable del tipo de mercado

N Número de productos a fabricar (u, Kg, m3, etc.)

Si “N” aumenta, el precio del producto disminuye hasta adoptar el valor cero (ideal), y N se transforma en N_p , denominándose mercado potencial (ver fórmula 2).

$$0 = X - y.N_p \quad (2)$$

El mercado potencial, es un dato estadístico que proviene de un estudio de marketing, una consultora o bien de la experiencia. Esto nos permite calcular la variable del tipo de mercado, expresada en la fórmula 3.

$$y = \frac{X}{N_p} \quad (3)$$

Si se asignan valores de demanda, y precios, se detecta que el modelo se puede adaptar a una economía de escala,

donde al aumentar la demanda, los costos disminuyen, pero esto posee un límite.

El modelo se adapta a una economía de escala, si se aumenta la producción, los costos disminuyen, pero con un cierto límite.

Luego, combinando este método con las fórmulas de economía clásica (ver fórmulas 4):

$$\begin{cases} U = V - C \\ C = F + v.N \\ V = P.N \end{cases} \quad (4)$$

Siendo: U (utilidad), V (ventas), v (costo variable unitario), F (costos fijos), N (cantidad de producto), C (costo total)

Se logra obtener cual es la cantidad óptima por producir:

$$N_{op} = \frac{(X - v)}{2.y} \quad (5)$$

Así se determina la cantidad de bioetanol que conviene obtener para alcanzar la máxima utilidad. [5][1]

Se propone en el caso estudiado valores de F, v, X, V, P, N_{máx} (mencionada como N_{op} en la fórmula 5) y N_p, confeccionando una planilla de cálculo (Tabla 1), a fin de simular escalas de producción diversas, para obtener la cantidad óptima de producto a fabricar, generando a su vez, la máxima utilidad, tratándose del objetivo principal de toda empresa.

Tabla 1: Punto de Equilibrio y Utilidades [1]

X	V	y	P	F	N _{máx}	N _p
100	60	0,001	80	300000	20000	100000

N	F	v . N	F+v . N	U	V	P
0	300000	0	300000	-300000	0	100
19000	300000	1140000	1440000	99000	1539000	81
19900	300000	1194000	1494000	99990	1593990	80,1
20000	300000	1200000	1500000	100000	1600000	80
20100	300000	1206000	1506000	99990	1605990	79,9
21000	300000	1260000	1560000	99000	1659000	79

Divisando en este caso que la cantidad óptima a producir es de 20000 unidades, a un precio de \$80, se puede confeccionar un gráfico con un diagrama de punto de equilibrio (Figura 1).

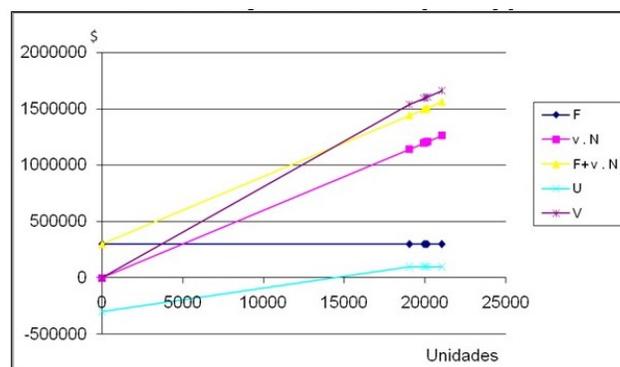


Fig. 1 - Diagrama de Punto de Equilibrio [1]

En la Figura 1 se puede observar que la curva de Utilidad, corta al eje de N (unidades) en 15000, siendo este el punto de equilibrio, ya que la utilidad es \$0, siendo este un punto muy importante para el proceso, por tratarse de la cantidad mínima a producir para no tener pérdidas.

Para este caso (bioetanol) es conocido el precio del mercado “X”, con detalle, por ende, si luego de realizar el análisis de factibilidad, se llegase a un precio “P” inferior, estaríamos en condiciones de afirmar, al menos de modo preliminar, la viabilidad del proceso de obtención del producto a través del método lignocelulósico [1].

B. Análisis de datos

Se fijan una serie de parámetros y escenarios para lograr calcular los diversos costos involucrados en la producción de bioetanol, con las condiciones que existen en la Argentina, en base a datos oficiales [3].

Escenario 1:

- Distancia máxima de transporte no supera un radio de 100km.
- Precio de producto en el mercado: 11989,86 \$/T
- Costos variables: 6639,7 \$/T
- Costos fijos estimados: 3000000\$
- Mercado potencial de bioetanol: 360000 T

En la Tabla 2 y en la Figura 2 pueden observarse los detalles de los cálculos correspondientes al escenario 1.

Tabla 2 Análisis de utilidades [1]

X	v	y	P	F	N _{máx}	N _p
11990	6640	0,03330556	9315	3000000	80316,9308	360000

N	F	v . N	F+v . N	U	V	P
0	3000000	0	3000000	-3000000	0	11990
79316,9308	3000000	526664420	529664420	211814484	741478905	9348,30556
80216,9308	3000000	532640420	535640420	211847457	747487877	9318,33056
80316,9308	3000000	533304420	536304420	211847790	748152210	9315
80416,9308	3000000	533968420	536968420	211847457	748815877	9311,66944
81316,9308	3000000	539944420	542944420	211814484	754758905	9281,69444

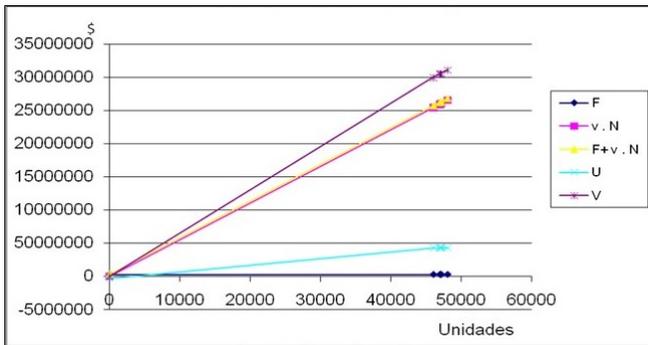


Fig. 2 - Análisis de utilidades escenario 1.

Escenario 2:

- Distancia máxima de transporte no supera un radio de 300km.
- Precio de producto en el mercado: 11989,86 \$/T
- Costos variables: 6892,7 \$/T (incrementa por costo de transporte)
- Costos fijos estimados: 3000000\$
- Mercado potencial de bioetanol: 360000 T

En la Tabla 3 y en la Figura 3 pueden observarse los detalles de los cálculos correspondientes al escenario 2.

Tabla 3 Análisis de utilidades [1]

X	v	y	P	F	Nmáx	Np
11990	6893	0,03330556	9441.5	3000000	76518,7656	360000

N	F	v.N	F+v.N	U	V	P
0	3000000	0	3000000	-3000000	0	11990
75518,7656	3000000	520550852	523550852	191974769	715525620	9474,80556
76418,7656	3000000	526754552	529754552	192007741	721762293	9444,83056
76518,7656	3000000	527443852	530443852	192008074	722451926	9441,5
76618,7656	3000000	528133152	531133152	192007741	723140893	9438,16944
77518,7656	3000000	534336852	537336852	191974769	729311620	9408,19444

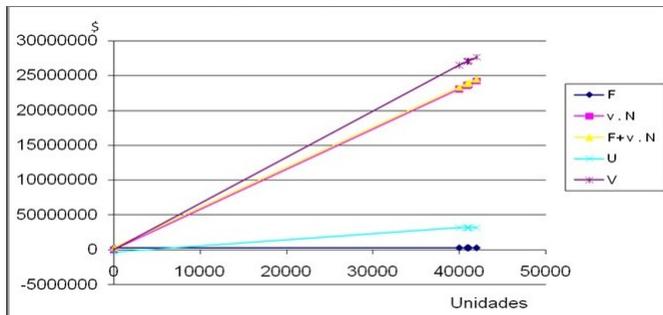


Fig. 3 - Análisis de utilidades escenario 2.

Escenario 3:

- Distancia máxima de transporte no supera un radio de 500 km.
- Precio de producto en el mercado: 11989,86 \$/T
- Costos variables: 7024,7 \$/T (incrementa por costo de transporte).
- Costos fijos estimados: 3000000\$

-Mercado potencial de bioetanol: 360000T

En la Tabla 4 y en la Figura 4 pueden observarse los detalles de los cálculos correspondientes al escenario 3.

Tabla 4 Análisis de utilidades [1]

X	v	y	P	F	Nmáx	Np
11990	7025	0,03330556	9507,5	3000000	74537,1143	360000

N	F	v.N	F+v.N	U	V	P
0	3000000	0	3000000	-3000000	0	11990
73537,1143	3000000	516598228	519598228	182005081	701603308	9540,80556
74437,1143	3000000	522920728	525920728	182038053	707958781	9510,83056
74537,1143	3000000	523623228	526623228	182038386	708661614	9507,5
74637,1143	3000000	524325728	527325728	182038053	709363781	9504,16944
75537,1143	3000000	530648228	533648228	182005081	715653308	9474,19444

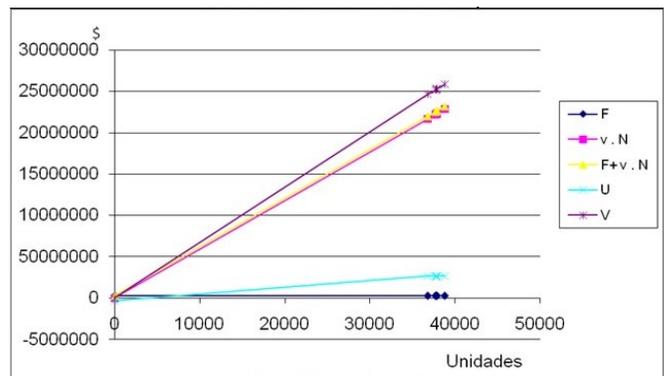


Fig. 4 - Análisis de utilidades escenario 3.

C. Análisis de resultados

Escenario 1:

Puede observarse que, luego de la fabricación del bioetanol por este método y en el escenario 1, se tiene un precio $P = 9315\$/T$ contra el precio del mercado de $X = 11990\$/T$ resultando competitivo por una diferencia de $2675\$/T$.

Se genera una utilidad "U" de $\$211847790$ para una producción "N" de $80317 T$ de bioetanol.

Todos estos datos pueden leerse resumidos en la Tabla 5.

Tabla 5 Resumen del escenario 1 [1]

Escenario	P(\$/T)	X(\$/T)	X-P(\$/T)	U(\$)	N(T)
1	9315	11990	2675	211.847.790	80317

Escenario 2:

En este caso, al aumentar la distancia de transporte a $300km$ los valores obtenidos se pueden resumir en la Tabla 6.

Tabla 6 Resumen del escenario 2 [1]

Escenario	P(\$/T)	X(\$/T)	X-P(\$/T)	U(\$)	N(T)
2	9441	11990	2549	192.008.074	76519

Escenario 3:

En el último caso de análisis, al aumentar la distancia de transporte a 500Km se obtienen los valores resumidos en la Tabla 7.

Tabla 7 Resumen del escenario 3 [1]

Escenario	P(\$/T)	X(\$/T)	X-P(\$/T)	U(\$)	N(T)
3	9507	11990	2483	182.038.386	74537

Posteriormente al análisis de los datos otorgados por las tablas de cada escenario, se percibe que existe una tendencia, en la que al aumentar la distancia de transporte de la materia prima hasta el punto de producción, se produce una disminución en la utilidad, con reducción en la factibilidad de obtener bioetanol a través del proceso lignocelulósico, ya que aumenta el precio, y es por ello que un proceso fundamental para aplicar este método, incluiría el no dejar de lado la localización de la planta industrial, ya que en materias primas de poco peso específico, y costo, la zona núcleo de ubicación de la empresa será cercana al lugar de donde provienen estas mismas.

III. CONCLUSIONES

El carácter condicionante de los costos del transporte de la materia prima hace que la ubicación de la planta para la producción del bioetanol lignocelulósico, tenga un impacto fuerte en la factibilidad económica. En este caso particular, la localización geográfica permite el desarrollo agroindustrial en pequeñas comunidades lugareñas, evitando la concentración económica en un solo punto del país, lo que trae desequilibrios regionales y un desaprovechamiento del territorio de la República Argentina, aunque en la misma existe una asignatura pendiente referida a la mejora de las tecnologías e infraestructuras del transporte.

Frente a un análisis presentado en esta publicación, se permite determinar que la ubicación de la planta industrial se debería encontrar en un radio entre 100 y 300 km del punto específico de mayor siembra de maíz, siendo ésta la mejor alternativa analizada desde el punto de vista geoeconómico.

En términos generales podemos afirmar que los cálculos realizados confirman la hipótesis planteada en base al modelo matemático elegido con las variables significativas seleccionadas. Dicho modelo nos permite predecir que existe la Factibilidad Económica de la Producción de Bioetanol Lignocelulósico a través del Rastrojo de Maíz.

Finalmente, respecto del objetivo general que se persigue, que es analizar un proceso alternativo de obtención de energía renovable para mejorar el nivel de vida de la población en forma sustentable, sumando valor agregado a nuestros productos, haciéndolos más competitivos y brindando la oportunidad de trabajo que dignifique a los trabajadores y las economías regionales de nuestro país, se ha podido demostrar que, al menos en términos económicos, el proceso alternativo basado en rastrojos de maíz es viable para la producción de bioetanol.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, a través de su Decano Dr. Ing. Oscar Manuel Pascal, a los Doctores Ingenieros Antonio Arciénaga Morales y Luis Bertoia por su buena predisposición, aportes y sugerencias para la elaboración de este trabajo como así también al alumno becario EVC-CIN Sr. Cristian Martín Michalczuk, por su colaboración en el uso de software específico.

REFERENCIAS

- [1] L. A. Orlandi. Tesis de Maestría: "Análisis de factibilidad económica de la producción de bioetanol lignocelulósico a partir de una fuente como el rastrojo de maíz y, eventualmente, de sorgo", Facultad de Ingeniería, UNLZ, 2017. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6525>.
- [2] Y. Sun; J. Cheng, "Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review". *Bioresource Technology* 83, pp 1–11, Marzo 2002. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?jsessionid=274FE9DE1289596A2AB52E9AB41B4241?doi=10.1.1.470.3174&rep=rep1&type=pdf>
- [3] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset?_tags_limit=0
- [4] R. H. Perry, D. W. Green. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. Ed. McGraw-Hill, 2003.
- [5] J. Riggs *Sistemas de Producción: Planeación Análisis y Control*. Ed. Limusa Wiley. México, 1999.