

Geoposicionamiento Estadístico-Sinérgico de una Planta Industrial de Bioetanol Lignocelulósico en Argentina

Statistical-Synergic Geopositioning of an Industrial Plant of Bioethanol Lignocellulosis in Argentina.

Luis Alberto Orlandi, Mgtr. Ing.¹, Irma Noemi No, Mgtr. Lic.¹, Maria Florencia Cibau, Esp. Ing.²

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

²YPF, Yacimientos Petrolíferos Fiscales S. A, Argentina, mflorencia.cibau@hotmail.com

Resumen– Argentina, desde el punto de vista agronómico, posee condiciones adecuadas para el desarrollo de insumos básicos necesarios para la producción de energía a partir de biomasa; también tiene un gran potencial y ventajas comparativas para la producción de biocombustibles. Asimismo, se pudo determinar el precio ex-work o precio del producto puesto en planta aumenta en función de la distancia de transporte de la materia prima, lo cual disminuye la factibilidad del proceso [1]. En cuanto a la ubicación específica de la planta existen varias técnicas e instrumentos de toma de decisiones, para la detección de la zona del país que asegure mayor provisión de materia prima para la futura elaboración del bioetanol lignocelulósico. Una combinación de la estadística con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y herramientas avanzadas de ingeniería industrial como el método sinérgico de Brown-Gibson permitirán la ubicación final de la planta industrial.

Palabras-Clave-- Biocombustibles; Bioetanol lignocelulósico; Geoposicionamiento; Estadística Sinérgica; Ubicación de planta industrial.

Abstract– Argentina, from the agronomic point of view, has adequate conditions for the development of basic inputs necessary for the production of energy from biomass; It also has great potential and comparative advantages for the production of biofuels. Likewise, it was possible to determine the ex-work price or price of the product placed in the plant increases depending on the transport distance of the raw material, which decreases the feasibility of the process [1]. Regarding the specific location of the plant there are several techniques and instruments for decision-making, for the detection of the area of the country that ensures greater provision of raw material for the future production of lignocellulosic bioethanol. A combination of statistics with the Global Positioning System (GPS) and advanced industrial engineering tools such as the Brown-Gibson synergistic method will allow the final location of the industrial plant.

Keywords-- Biofuels; Lignocellulosic bioethanol; Geopositioning; Synergistic Statistics; Industrial plant location.

I. INTRODUCTION

A. Situación Problema

Las energías alternativas son una solución eficiente al constante incremento de la demanda energética a nivel mundial, en el caso del bioetanol tradicional obtenido por ejemplo del maíz o de la caña de azúcar, compite directamente con productos alimenticios, nuestra propuesta es partir de una materia prima como el rastrojo de maíz o sorgo que se considera un desecho no compitiendo de ninguna manera con la alimentación.

La finalidad es determinar geográficamente el óptimo posicionamiento de plantas que utilicen los derivados/desechos del sorgo y el maíz como materia prima, se utilizan los datos de la última campaña de producción agropecuaria nacional (2017/2018), disponible en la página del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina [2].

El método de análisis de conglomerados (análisis clúster) elegido para el tratamiento de los datos se basa en el agrupamiento de estos por características similares (en nuestro caso productividad/localización) y disimilitudes o diferenciación intergrupal.

B. Bioetanol Lignocelulósico

Desde el año 2005 hasta la actualidad la demanda energética en la argentina se encuentra en un constante aumento que oscila en un 10% anual, generando una imperiosa necesidad de incrementar y diversificar la matriz energética y por consiguiente no depender solamente de combustibles fósiles como el petróleo.

La obtención de combustibles fósiles, por el momento pueden incrementar su producción en base a nuevas tecnologías en exploración y refinación como así también en el hallazgo de yacimientos de petróleo no convencionales.

En los últimos años la argentina se ve necesitada de importar petróleo y sus derivados ya que no puede satisfacer la demanda, en ese escenario la opción de los combustibles no convencionales son una solución posible para logra un balance en la matriz energética nacional.

El bioetanol es un bio-sustituto de los combustibles convencionales, se obtiene de la fermentación alcohólica de la

caña de azúcar, en la actualidad y por ley los combustibles como las naftas tienen un porcentaje de etanol en su formulación, generando un ahorro de combustibles fósiles y preservando el medio ambiente, evitando que se produzcan parcialmente gases de efecto invernadero que generan el calentamiento global.

La Ley 26.093 define como " biocombustibles" al bioetanol, biodiesel y biogás, que se produzcan a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, que cumplan los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación.

Debido a la gran superficie cultivable de la Argentina las plantas productoras de bioetanol se encuentran fuera de los centros urbanos más poblados generando la descentralización y empleo donde más se los necesita, impulsando asimismo el desarrollo de zonas del interior del país.

En cuanto al origen del bioetanol se distinguen dos procedimientos: los que utilizan como materia prima cultivos alimenticios tales como el maíz, trigo, sorgo y cebada, se los denomina de primera generación y compiten directamente con los alimentos, en cuanto a los de segunda generación son aquellos que se obtienen a partir de residuos forestales o residuos de procesos agroindustriales, básicamente se trata de una materia prima que no resta recursos a la industria alimentaria. Por el contrario, el material lignocelulósico podría aportar numerosas ventajas en la obtención de una fuente energética sustentable y renovable.

C. Proceso Industrial

1) *Molienda*: Hay dos tipos de molienda, en seco y mojada. Durante el proceso de molienda en mojado, el grano está separado en sus componentes, el almidón se convierte en etanol y los componentes restantes o subproductos se venden; durante el proceso de molienda en seco, los granos no están fraccionados y todos sus nutrientes entran en el proceso y se concentran en un subproducto de la destilación utilizado para el alimento animal.

2) *Pretratamiento*: Los pretratamientos tienen por objetivo romper la matriz de lignina presente en el material, para dejar expuestos los distintos polisacáridos para que sean reducidos a azúcares fermentables a través de hidrólisis enzimática.

3) *Detoxificación*: Durante los procesos de pretratamientos e hidrólisis de la biomasa lignocelulósica, se generan una gran cantidad de compuestos que pueden inhibir el proceso. Por esta razón y dependiendo del tipo de pretratamiento pueden emplearse los métodos de detoxificación, que pueden ser físicos, químicos o biológicos.

4) *Hidrólisis*: Los polímeros de carbohidrato presentes en los materiales lignocelulósicos necesitan ser convertidos a azúcares simples antes de la fermentación, a través de un proceso llamado hidrólisis. Se clasifica en hidrólisis química y enzimática.

5) *Fermentación*: El hidrolizado del material lignocelulósico no solo contiene glucosa que es el primer

producto de fermentación, sino también contiene varios monosacáridos como la xilosa, manosa, galactosa, arabinosa y oligosacáridos que igualmente deben ser fermentados por microorganismos para una eficaz producción de bioetanol.

6) *Destilación*: Tanto la hidrólisis como la fermentación de la biomasa originan subproductos, y se han desarrollado tecnologías para su recuperación. En el caso en que los productos de fermentación son más volátiles que el agua su recuperación se hace generalmente por destilación. Un proceso de destilación separa el bioetanol de la mezcla líquida con el agua, por lo tanto, el primer paso es recuperar el bioetanol en una columna de destilación, donde la mayoría de los remanentes de agua y partes sólidas son removidos, el producto (37% bioetanol) se concentra en una columna, aquí los procesos se llevan a cabo con un excesivo cuidado para reducir las pérdidas en un 99.6%. Después del primer paso, los sólidos son separados usando una centrífuga y una secadora rotativa, una parte de los sólidos recuperados (25%) son fermentados nuevamente y el resto se evapora, aunque gran parte de lo evaporado se recupera nuevamente [3].

II. MÉTODO ESTADÍSTICO

A. Análisis Estadístico

En el presente análisis estadístico descriptivo se utilizan las bases de datos oficiales, publicadas por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina, correspondientes al sector de la agroindustria nacional.

Se han seleccionado aquellos conjuntos de datos (datasets) de interés para la investigación, en su formato de origen (extensión .csv). La manipulación de los datos se realiza mediante herramientas de cálculo estadístico gratuitas y de código abierto (entorno de desarrollo "R") [4].

Considerando como objetivo del trabajo estadístico la detección de la zona del país que asegure mayor provisión de materia prima (obtenida a partir del sorgo y maíz)[5], para la futura elaboración de bioetanol, se utilizan conceptos asociados a la determinación de conglomerados por proximidad/productividad [6].

B. Valores Absolutos de las Variables

En la Tabla I se exponen las cantidades correspondientes a las principales variables de los datasets agropecuarios oficiales. Los períodos de cultivo identificados con los números 47, 48 y 49 se corresponden con las campañas 2015/2016, 2016/2017 y 2017/2018, respectivamente (nomenclatura declarada en las bases del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina).

Las unidades de medida son:

- Superficie Sembrada: Hectárea.
- Superficie Cosechada: Hectárea.
- Producción: Tonelada.
- Rendimiento: Kilogramo por hectárea.

TABLA I
CANTIDADES CORRESPONDIENTES A LAS ÚLTIMAS TRES CAMPAÑAS RELEVADAS

| Variable | Campañas Maíz | | |
|----------------------|----------------|----------|----------|
| | 47 | 48 | 49 |
| Superficie sembrada | 6904538 | 8486694 | 9139766 |
| Superficie cosechada | 5346593 | 6536763 | 7138620 |
| Producción | 39792854 | 49490326 | 43462323 |
| Rendimiento | 1840367 | 1891360 | 1547500 |
| Variable | Campañas Sorgo | | |
| | 47 | 48 | 49 |
| Superficie sembrada | 842571 | 728280 | 640620 |
| Superficie cosechada | 673550 | 541955 | 437463 |
| Producción | 3029330 | 2526931 | 1563445 |
| Rendimiento | 920375 | 981003 | 757528 |

Realizando un trazado serial histórico, basado en las campañas cuyos datos se encuentran digitalizados y disponibles de manera abierta en los sitios mencionados, observamos una tendencia productiva creciente en modalidad conjunta para los cereales maíz y sorgo (Figura 1).

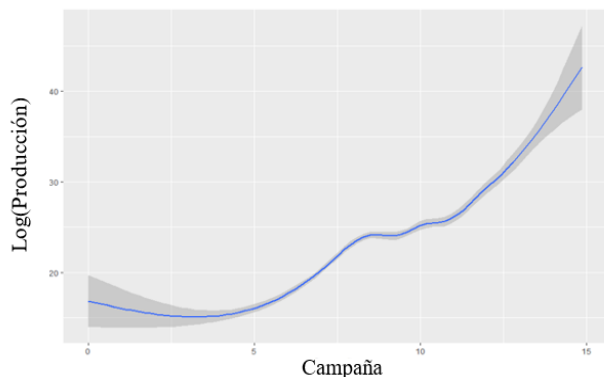


Fig. 1 Evolución histórica de los niveles productivos conjuntos maíz-sorgo.

C. Distribución Geográfica

Las cantidades de maíz y sorgo producidas por provincia/municipio, según la última campaña relevada, se detalla a continuación utilizando una herramienta de visualización del peso de cada zona geográfica (por localidad y provincia) según la participación de la producción de los cereales estudiados. Se logra inferir una importante preponderancia de las provincias de Córdoba, Santa Fé, Buenos Aires, y Santiago del Estero como centros productivos de elevada envergadura. La zona norte, con Formosa y Salta como distinguidas, parecen especializarse en alta producción de sorgo y maíz respectivamente (Figura 2).

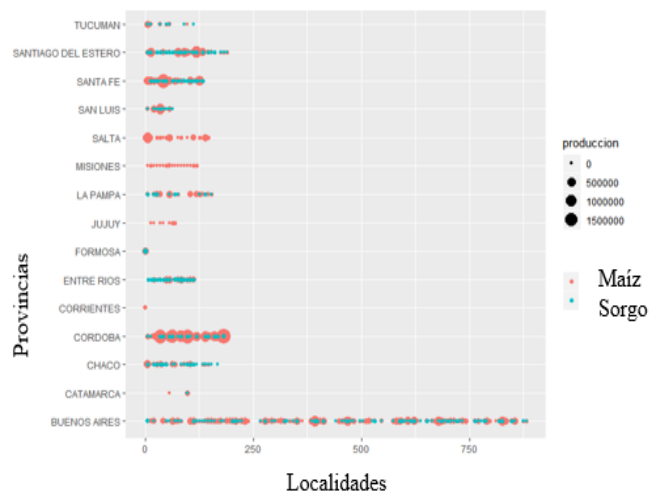


Fig. 2 Productividad de cada cultivo por Provincia/Localidad- Campaña 49

D. Análisis de Conglomerados

Siguiendo el objetivo de determinar geográficamente el óptimo posicionamiento de plantas que utilicen los derivados/desechos del sorgo y el maíz como materia prima, se utilizan los datos de la última campaña de producción agropecuaria nacional (2017/2018), disponible en la página del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina.

Como se ha mencionado en la introducción la metodología elegida para el tratamiento de los datos se basa en el agrupamiento de estos por características de similaridad intragrupo (en nuestro caso productividad/localización) y disimilitudes o diferenciación intergrupala [7]. La métrica definida para el procedimiento utiliza herramientas del software “R” y de sistemas abiertos de información geográficos (SIG) de georreferenciación.

Para favorecer al objetivo de la determinación de la ubicación de la planta, se restringe el universo de localidades a aquellas que detentan la mayor productividad del cultivo (en la campaña 49), obteniendo un listado de 21 localidades destacadas para el maíz y 26 localidades para el sorgo.

Se demostró que el número “n” de clusters estadísticamente más fiable según las técnicas recursivas de reagrupamiento y centralización es de: n=4 para el maíz y n=5 para el sorgo [8].

E. Clusters de Maíz

Luego de ejecutado el análisis estadístico con la metodología anteriormente expuesta, las localidades fueron asignadas por el entorno de desarrollo integrado “R” a diferentes grupos de pertenencia (clusters).

En la ilustración 3 se ejemplifica la distribución por conglomerados de las 21 localidades distinguidas de maíz por productividad geo-conjunta.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

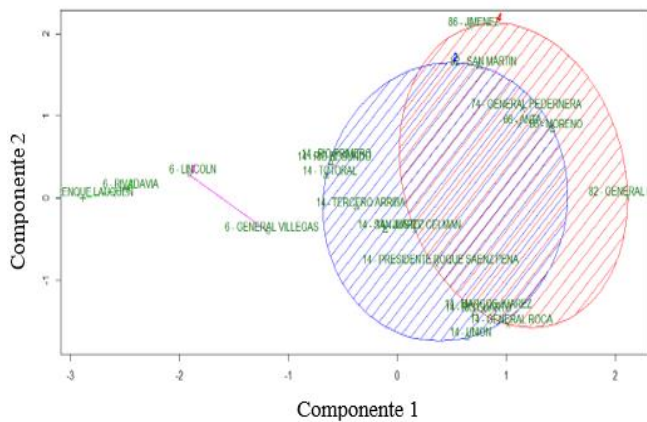


Fig. 3 Clusters de Maíz – Campaña 2017/2018

En la Tabla II puede observarse la composición de cada uno de estos cuatro conglomerados expresada en detalle.

TABLA II
COMPOSICIÓN DE LOS CONGLOMERADOS DE MAÍZ - CAMPAÑA 49

| Localidades de mayor Productividad | Provincia | Producción | Cluster |
|------------------------------------|---------------------|-----------------|---------|
| 14 – UNION | Córdoba | 193301 2 | 2 |
| 14 - GENERAL ROCA | Córdoba | 174199 2 | 4 |
| 82 - GENERAL LOPEZ | Santa Fé | 170287 7 | 4 |
| 14 - RIO CUARTO | Córdoba | 158673 7 | 2 |
| 14 - MARCOS JUAREZ | Córdoba | 153713 4 | 4 |
| 14 –PTE. ROQUE SAENZ PEÑA | Córdoba | 107580 5 | 4 |
| 86 – MORENO | Santiago del Estero | 104093 5 | 2 |
| 14 - SAN JUSTO | Córdoba | 809312 2 | 2 |
| 14 - JUAREZ CELMAN | Córdoba | 807824 4 | 4 |
| 66 – ANTA | Salta | 748203 4 | 4 |
| 74 - GENERAL PEDERNERA | San Luis | 741003 4 | 4 |
| 6 - GENERAL VILLEGAS | Buenos Aires | 726236 1 | 1 |
| 14 - TERCERO ARRIBA | Córdoba | 672361 2 | 2 |
| 82 - SAN MARTIN | Santa Fé | 589724 2 | 2 |
| 6 - TRENQUE LAUQUEN | Buenos Aires | 549828 3 | 3 |
| 14 – TOTORAL | Córdoba | 521618 2 | 2 |
| 6 – RIVADAVIA | Buenos Aires | 511044 3 | 3 |
| 14 - RIO SEGUNDO | Córdoba | 464659 2 | 2 |
| 6 – LINCOLN | Buenos Aires | 455463 1 | 1 |
| 86 – JIMENEZ | Santiago del Estero | 454999 4 | 4 |
| 14 - RIO PRIMERO | Córdoba | 452684 2 | 2 |
| TOTAL | | 19123450 | |

F. Geoposicionamiento

A partir de la determinación de conglomerados productivos mediante el agrupamiento de localidades “similes” (según los criterios establecidos), se elaboran los mapas en geoplataformas abiertas [9]. Geográficamente la distribución

de las localidades de mayor productividad en la campaña 49, coloreadas por cluster de maíz, se observa en la Figura 4.



Fig. 4 Localidades de mayor productividad de maíz coloreadas por cluster

G. Determinación de centroides

El uso conjunto de herramientas de análisis multivariante de conglomerados en “R” y los sistemas de información geográfica abiertos permiten obtener una síntesis visual de la ubicación georreferenciada de los centroides óptimos logístico-productivos para la ubicación de una planta industrial. Este resultado es un punto de partida para un análisis posterior en otras dimensiones orientado a la toma de una decisión definitiva. La vista del mapa que reúne los cuatro centroides de mayor productividad (dos correspondientes al maíz y dos al sorgo) se muestra en la Figura 5.

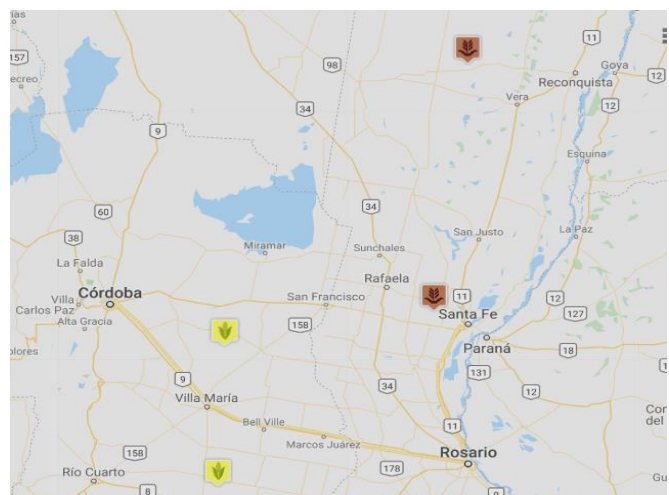


Fig. 5 Centroides más productivos de ambos cultivos - Campaña 49

$$FO_i = \frac{1/Ct_i}{\sum_{i=1}^n 1/Ct_i} \quad (1)$$

III. MÉTODO SINÉRGICO

A. Factores Críticos

Elementos clave para la organización. Su calificación es binaria, es decir, 1 o 0 y se clasifican en: energía eléctrica, mano de obra, materia prima, seguridad.

El Factor crítico de una zona se determina como el producto de las calificaciones de los subfactores, cualquier calificación en 0 resulta en la nulidad del Factor crítico.

B. Factores objetivos

Son aquellos relevantes para la ubicación de la planta como costos fijos costo del lote, costo de mantenimiento, costo de construcción, costo de materia prima, etc.

C. Factores subjetivos

Factores cualitativos, pero que afectan de forma relevante el funcionamiento de la empresa. Su calificación se da en porcentaje (%) y se clasifican en: impacto ambiental, clima social, servicios comunitarios (Hospitales, Bomberos, Instituciones, etc.), transporte, competencia y actitud de la comunidad.

D. Aplicación del método de Brown & Gibson

En base al cálculo estadístico anterior se determinó que las provincias donde se encuentran los centroides son Santa Fé y Córdoba y las localidades más cercanas son Unión, General Roca y Marcos Juárez en Córdoba y San Martín en Santa Fé, quedando los factores críticos reflejados en la Tabla III [10].

TABLA III
FACTORES CRÍTICOS

| Localidades | Factores Críticos (FC _i) | | Factores objetivos para el funcionamiento de la industria (base 10 ³) | | | | |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------|---|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--|
| | Materia Prima | Servicios | Costo de Mat. Prima [\$/ton] | Costo por Ha. de campo [\$] | Costo Variable de transporte | Costo distancia clientes | Costo factor unitario (Ct _i) |
| Unión (CBA) | 1 | 1 | 10 | 480 | 4.92 | 1.64 | 511 |
| General Roca (CBA) | 1 | 1 | 11.1 | 960 | 4.66 | 1.55 | 991 |
| Marcos Juárez (CBA) | 1 | 1 | 12.5 | 900 | 4.37 | 1.46 | 931 |
| San Martín (Santa Fé) | 1 | 1 | 32.8 | 1080 | 4.86 | 1.62 | 1134 |

En la tabla IV, se calcularán a través de la fórmula 1 los factores objetivos seleccionados en la tabla previamente realizada, los factores objetivos expresados en decimales tal que sumados todos juntos, brindarán un resultado igual a "1".

TABLA IV
FACTORES OBJETIVOS

| Localidades | Factores objetivos para el funcionamiento de la industria | | |
|-----------------------|---|--|---------------------|
| | Costo factor Unitario (Ct _i) | Cálculo del Factor Objetivo (FO _i) | Factor Objetivo (%) |
| Unión (CBA) | 511330.1214 | 0.397490894 | 39.7490894 |
| General Roca (CBA) | 991282.0779 | 0.20503656 | 20.503656 |
| Marcos Juárez (CBA) | 931399.765 | 0.218218938 | 21.8218938 |
| San Martín (Santa Fé) | 1133863.188 | 0.179253608 | 17.9253608 |
| Totales | | 1 | 100 |

En la Tabla V, se deben asignar los factores subjetivos con su respectiva ponderación porcentual.

TABLA V
FACTORES SUBJETIVOS

| Factores Subjetivos | Ponderación (%) | Unión (CBA) | General Roca (CBA) | Marcos Juárez (CBA) | San Martín (Santa Fé) |
|--|-----------------|-------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| | | | | | |
| Disponibilidad de Materia Prima | 47 | 47 | 47 | 23.5 | 0 |
| Disponibilidad de Mano de Obra | 3 | 3 | 0 | 3 | 0 |
| Disponibilidad de Servicios | 15 | 15 | 7.5 | 15 | 7.5 |
| Distancia hasta los clientes | 30 | 0 | 15 | 30 | 0 |
| Acesibilidad | 5 | 5 | 2.5 | 5 | 2.5 |
| Total (%) | 100 | 70 | 72 | 76.5 | 10 |
| Porcentaje en valor/100 (FS _i) | | 0.7 | 0.72 | 0.765 | 0.1 |

El indicador de localización se determinará en la Tabla VI en base a la fórmula 2 con un factor de confiabilidad adoptado de alfa = 0.8 .

$$IL_i = FC_i \{ (FO_i * \alpha + [(1 - \alpha)(FS_i)] \} \quad (2)$$

TABLA VI
INDICADOR DE LOCALIZACIÓN

| Ciudad | Indicador de Localización (IL _i) |
|-------------|--|
| Unión (CBA) | 0.457992715 |

| | |
|-----------------------|-------------|
| General Roca (CBA) | 0.308029248 |
| Marcos Juárez (CBA) | 0.327575150 |
| San Martín (Santa Fé) | 0.163402886 |

Finalmente se observa que la ciudad elegida para la ubicación de la planta es Unión, provincia de Córdoba con el máximo valor indicador de localización de 0.457992715.

IV. CONCLUSIONES

Utilizando técnicas estadísticas combinadas con el método sinérgico de Brown & Gibson, se pudo evaluar entre diversas opciones de ubicación de una planta industrial de bioetanol lignocelulósico, la más conveniente para su geolocalización, esto permitirá favorecer a las pequeñas economías regionales integrando la cadena de valor de los productos y subproductos obtenidos y así mejorar la calidad de vida de las personas que habitan dicha región.

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] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset?_tags_limit=0
- [3] R. H. Perry, D. W. Green. Perry's Chemical Engineers Handbook. Ed. McGraw-Hill, 2003.
- [4] RStudio. Software estadístico. <https://www.rstudio.com/>
- [5] A. Guazzelli. “Técnicas de Modelado Predictivo. Predicciones sobre el futuro Parte 3”. Recursos bibliográficos IBM. <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/industry/library/ba-predictive-analytics3/index.html>.
- [6] J. Martínez Moguerza. “Minería de Datos”. Material de Estudio para el Máster en Ingeniería de Sistemas de Decisión de la URJC, España, 2016/2017.
- [7] C. M. Bishop “Pattern Recognition and Machine Learning”. Springer, 2006. http://cds.cern.ch/record/998831/files/9780387310732_TOC.pdf
- [8] R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Store. “Pattern Classification”. John Wiley & Sons, Wiley Interscience 2^{da} Edición, 2001, New York, USA.
- [9] Google Maps. Software de Geoposicionamiento Global. Mapa producido. https://drive.google.com/open?id=1VPcRsIGbYQA0FrkGQRUv0OwvZp1_U3Ld&usp=sharing
- [10] B. Salazar López. “Método sinérgico de localización de plantas industriales (Brown y Gibson)”. *Métodos de Localización de Planta*. <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/disenio-y-distribucion-en-planta/metodos-de-localizacion-de-planta/>