

Potencial de producción de Bioetanol a partir de Caña Panelera: dinámica entre contaminación, seguridad alimentaria y uso del suelo

Potential production bioethanol from the Panela Cane: dynamics between pollution, food safety and land use

Javier Arturo Orjuela C.
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
jorjuela@udistrital.edu.co

Isaac Huertas
Universidad Católica de Colombia
Facultad de Ingeniería
isaac.huertas@unimilitar.edu.co

Juan Carlos Figueroa
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
jhonpetrucci2000@yahoo.es

Dusko Kalenatic
Universidad Católica de Colombia
Facultad de Ingeniería
dkalenatic@ucatolica.edu.co

Katerine Kadena
Universidad Católica de Colombia
Facultad de Ingeniería
auxproduccion@lacampina.com.co



Fecha recibido: Enero 11/2011
Fecha modificado: Abril 11/2011
Fecha aceptado: Mayo 11/2011

Resumen

La generación de combustibles a partir de productos agrícolas llamados agro-combustibles o biocombustibles ha sido impulsada recientemente como alternativa a los altos precios del petróleo y la contaminación debida al dióxido de carbono. Debido a que las materias primas usadas para la obtención de bioetanol o biodiesel son empleados original y primordialmente en la producción de alimentación humana, esta alternativa plantea un dilema para los productores frente al uso del suelo, en especial al sopesar los precios pagados por el sector energético contra los del sector alimentario.

La caña panelera es una de las materias primas con mayor rendimiento para la producción de bioetanol y es de especial relevancia para Colombia, siendo este país el segundo productor de panela en el mundo después de la India y el mayor consumidor per cápita del mundo (37,4 Kg/Hab). El estudio que presentamos a continuación está enfocado en analizar la dinámica de la producción de bioetanol a partir de caña panelera, siguiendo un enfoque prospectivo, a partir de la dinámica generada por el uso del suelo, la contaminación y la seguridad alimentaria, que contrasta con investigaciones previas realizadas desde la perspectiva de incentivos en la cadena de suministro de agro-combustibles [1].

El artículo presenta la caracterización de la caña panelera en Colombia, los proyectos vigentes y en desarrollo para la producción de agro-combustibles en Colombia, la influencia del precio de petróleo en azúcar y panela, igualmente la producción de agro-combustible a partir de caña. Los datos históricos son tratados con estadística multivariada y redes neuronales con



el fin de predecir el comportamiento futuro en la producción de caña panelera. La dinámica de la cadena frente a la problemática es estudiada a partir de la identificación de factores y variables relevantes y su diagrama causal.

Palabras clave: Biocombustibles, Bioetanol, Agro-combustibles, Caña Panelera, Análisis Multivariado, Redes Neuronales, Dinámica de Sistemas.

Abstract

As a solution to both oil high prices and pollution, grown-product fuel-generation (so-called biofuels) policies and projects have been promoted worldwide. Because raw materials involved in Bioethanol-and-Biodiesel making are used for human-consumption food production, producers face dichotomy regarding ground use, especially due to the prices paid to producers by either the energy or the food-production sector.

Although the bio-fuel supply-chain dynamics have been studied from an incentives viewpoint [37], an understanding of the supply-chain prospective is necessary based on the dynamics of three aspects, namely ground use, pollution and food safety.

The Panela cane is one of the raw materials with the best performance for Bioethanol production. Because Colombia is the highest per-capita Panela consumer (37,4 Kg/Inhab) and the second producer in the world (after India), this article analyzes Bioethanol production dynamics based on Panela cane.

Throughout the present article four aspects are discussed, namely Colombian Panela cane characterization, Colombian bio-fuel production current-projects development, oil-price influence on both Panela and sugar prices, and finally Panela cane bio-ethanol production. Historical data are forecasted through multivariate statistics and neural networks with the purpose of predicting future behavior within Panela cane production.

In the context of the aforementioned dichotomy, Panela cane chain dynamics are studied based on the identification of both factors and variables, which are presented through a causal diagram.

Key words: Bio-fuel, Bioethanol, Panela cane, multivariate statistics, neural networks, dynamic system.

1. Introducción

La humanidad enfrenta grandes retos en el siglo XXI en relación al avance de la industrialización y el desarrollo de los países, en particular en lo que se refiere a la contaminación y el cambio climático. La utilización de combustibles fósiles mediante el uso de hidrocarburos y carbón, recursos no renovables, generan niveles no deseados de contaminación.

Por otra parte, en la última década los precios de los hidrocarburos han venido en ascenso de manera continua, el petróleo ha llegado a precios cercanos a 135 USD/bl. Si bien la crisis económica mundial ha implicado una reducción importante en los precios en los años 2008-2009, se espera que superada la crisis financiera, los precios vuelvan a tomar su tendencia creciente, como evidencia su evolución en el 2010-2011.

Los gobiernos han tratado de solucionar esta problemática con diferentes estrategias, tales como el uso de energías alternativas solar, eólica, atómica, o la obtención de combustibles a partir de productos agrícolas. En relación a esto último, la capacidad para producir agrocombustibles depende de la disponibilidad de la tierra, esto limita la producción en ciertos países. Por ejemplo, la Unión Europea destinando el 70% de sus tierras podría producir 10% del combustible fósil; por su parte EEUU, para producir bioetanol a base de maíz tiene como máximo potencial el 10% de su consumo de gasolina [1]; otro estudio indicaría que destinando la producción de maíz a los agrocombustibles abastecería el 12 % de gasolina [2].

Los países de América Latina presentan condiciones ideales para la producción de agrocombustibles tales como el alto porcentaje de áreas húmedas (40%) y los recursos hídricos renovables, los bajos costos de producción en las zonas tropicales [4] o a sus bajos costos salariales [5]. Países suramericanos como Brasil han tenido una política expansiva en la siembra de caña como materia prima de bioetanol, esto dado su potencial, con un 0,5% de su tierra cultivable podría sustituir la mitad de la demanda de gasolina, a lo anterior se suma los altos rendimientos de caña 6000 lts/Hect. frente a maíz 3000 lts/Hect [3].

Colombia regula a partir de la ley 693 de 2001 la producción de alcoholes carburantes y bioetanol, y mediante la ley 939 de 2004 la producción de biodiesel y bioetanol, los cuales deben ser usados en una mezcla con gasolina, con reemplazo de un 20% para el 2010 [6]. Debido a ello se han creado varias plantas productoras de combustible usando como materias primas productos agrícolas, tales como palma africana y caña de azúcar, para biodiesel y bioetanol respectivamente.

Estas políticas requieren ser analizadas en Colombia así como en otros países de América del Sur, pues la población de este continente presenta altísimos niveles de hambre y la utilización de suelos para los dos propósitos pondría en riesgo la seguridad alimentaria. La seguridad alimentaria garantiza la disponibilidad y acceso a los alimentos, culturalmente aceptables para la población, tanto en cantidad, calidad y variedad [7]. La FAO en el nuevo entorno de globalización acuña el concepto de “autosuficiencia alimentaria” [8]. Mientras entre 1990 y 2004 la cantidad de personas mal nutridas en países en desarrollo aumentó de 823 millones a 830 millones según FAO, la proporción de personas mal nutridas en el primer mundo disminuyó del 20 al 17 por ciento [9].

En este contexto y dada la importancia que tiene para Colombia la producción de panela, este artículo analiza el impacto que tiene la producción de bioetanol a partir de caña demanda de materias primas en la próxima década, lo que genera un aumento en los precios de los alimentos y por ende amenaza a la seguridad alimentaria [10].

En este contexto surge el desafío de la formulación de políticas de la seguridad alimentaria, de forma que se asegure la sostenibilidad del medioambiente y un sistema internacional favorable al desarrollo sostenible de los biocombustibles [12].

Lo anterior se debe a la gran cantidad de materias agrícolas que pueden ser utilizadas para bio-combustibles. Para la producción de biodiesel se puede usar como materias primas agrícolas la palma africana [13], el cocotero, higuera, aguacate, canola, maní, soya y



girasol [14]. Por su parte, para la obtención de alcohol carburante (bioetanol) se utiliza yuca, maíz, caña de azúcar o papa, entre otros. En su producción, se emplean tres procesos de fermentación alcohólica diferentes. La fermentación de los compuestos orgánicos acompañada de un proceso de destilación y secado, utiliza como materias primas como la caña de azúcar, panelera o remolacha azucarera [15].

Los rendimientos reportados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural colombiano para bioetanol [16], son de 9.000 litros por hectárea para la caña, para remolacha 5000 (l/ha), 4.500 para yuca (l/ha), sorgo 4.400 (l/ha) y 3.200 (l/ha) para maíz.

3. Caracterización de la cadena panelera colombiana

Según cifras de la FAO, 25 países en el mundo producen panela; para el periodo 1998-2002, la India concentró el 65% de la producción mundial, mientras que Colombia cerca del 13%, haciéndose evidente que la producción mundial de panela se concentra en éstos dos países, siendo Colombia el mayor consumidor per cápita (37,4 Kg/Hab) [17]. No obstante la producción se orienta al mercado interno, lo cual no le permite ampliar su demanda fácilmente y se ve expuesto a la competencia del azúcar, los edulcorantes sintéticos y las bebidas artificiales [28].

La panela en Colombia es un renglón muy importante de la producción agropecuaria nacional, dado su participación en la producción, empleo y área utilizada en caña panelera. Para el año 2008 la caña participó con el 9.7% del área destinada a cultivos permanentes y con el 5.7% del área total cultivada en Colombia, se ubica en el quinto lugar entre los cultivos del país, solamente superado por café, maíz, arroz y plátano [18].

En Colombia se estiman aproximadamente 194.021 hectáreas de tierras dedicadas al cultivo de la caña panelera en 2009 (ver Figura 1), se encuentra dispersa en las regiones del país, en alturas comprendidas entre el nivel del mar y los 2.000 metros. Según el ministerio de agricultura (estadísticas Agronet), durante el año 2009 la producción de caña panelera se produjo en 24 de los departamentos de Colombia. La tasa de producción creció a una tasa promedio de 0,7 % anual, mientras el área disminuyó a 0,2%, con un crecimiento en cuanto al rendimiento de 0,9% promedio anual [18].

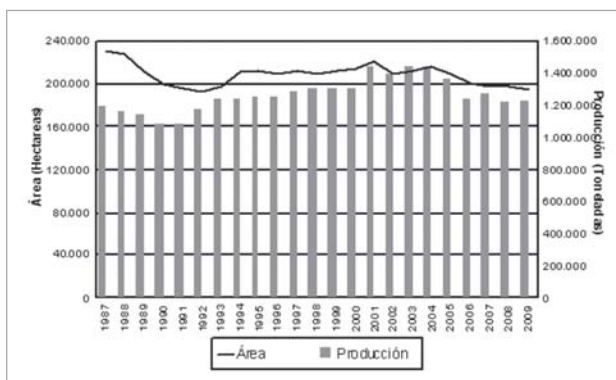


Figura 1. Producción y Área Cosechada de Caña Panelera en Colombia.

Fuente: Agronet en: <http://www.agronet.gov.co> (22/Nov/2010) [18]

Desde el año 1987 hasta el 2004 el rendimiento por hectárea ha pasado de 5.16 (ton/ha) a 6,7 (ton/ha) un aumento de 1.54(ton/ha), con una producción de 1.196.450 y 1.444.387 toneladas respectivamente, disminuyendo el área sembrada en 16.410 hectáreas. No obstante, en el periodo 2004 a 2009 se ha presentado una pendiente negativa alcanzando la producción de 1.227.313 toneladas en 2009, disminuyendo el área cosechada a 194.121 hectáreas y su rendimiento a 6.3 (ton/ha), como se observa en la Figura 2.

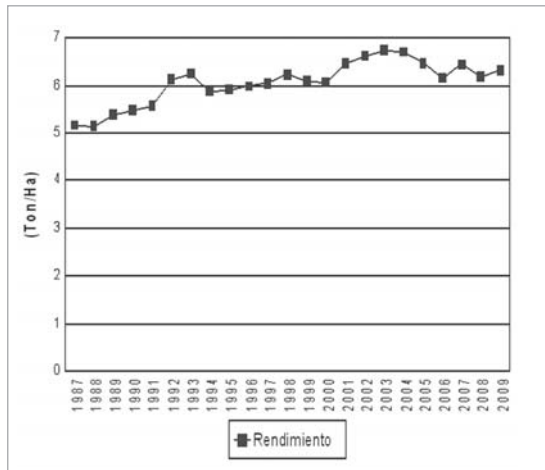


Figura 2. Evolución Histórica de Rendimiento de Caña Panelera en Colombia.

Fuente: Tomada de Agronet en: <http://www.agronet.gov.co> visitado el 22 de noviembre de 2010 [18]

La producción de caña panelera para el 2009 se concentró básicamente, en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Santander y Antioquia con el 60,34% del total producido. En la región Andina y en los Valles Interandinos, se concentra el cultivo y el mayor número de productores aportando más del 90% de la producción [18]. La participación porcentual por grupos representativos se presenta la Figura 3. .

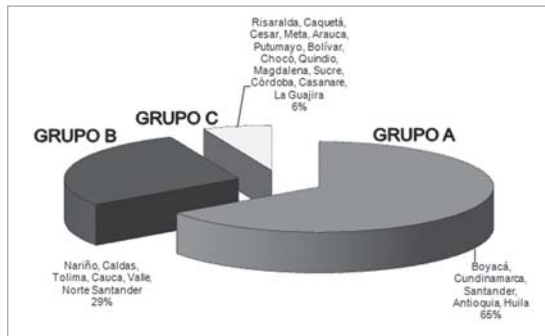


Figura 3. Participación porcentual por grupos representativos 2009.

Fuente: Esta investigación. Elaborada a partir de datos reportados en: [19] y [20] visitado el 6 de septiembre de 2009.

Al observar la participación porcentual a nivel departamental, tal como lo muestra la Figura 4, se puede comprender la importancia que el departamento de Boyacá, Cundinamarca y Santander tienen en la producción de caña panelera a nivel nacional bajo el criterio de toneladas producidas al año. Por su parte el comportamiento histórico de la producción por los cuatro departamentos principales productores se presenta en le Figura 5, mientras en el Figura 6 el comportamiento histórico del área sembrada en los cuatro departamentos principales productores.

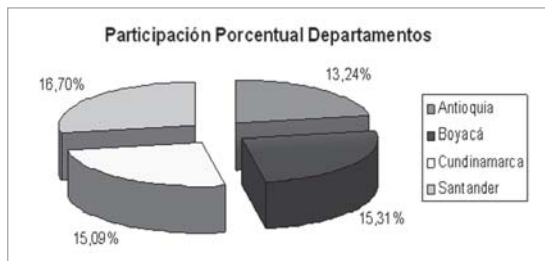


Figura 4. Participación porcentual por departamentos 2009.

Fuente: Esta investigación. Elaborada a partir de datos reportados en: [18].

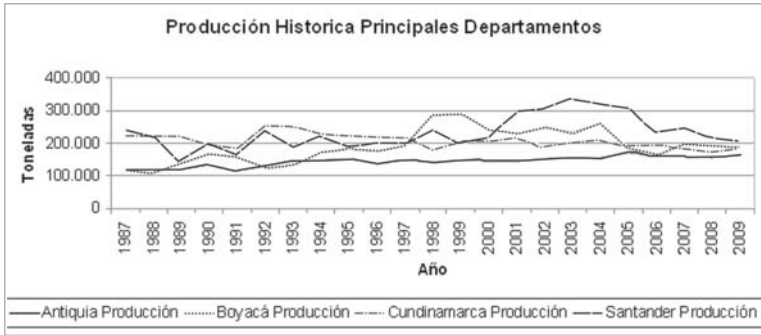


Figura 5. Histórico de la producción de caña panelera en Colombia (Toneladas).

Fuente: Esta investigación. Elaborada a partir de datos reportados en: [18] visitado el 22 /11/ 2010

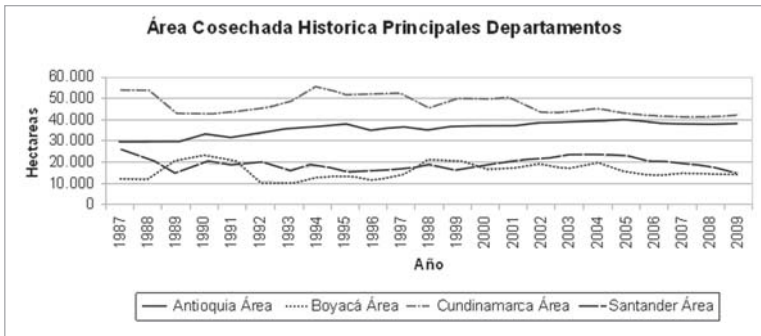


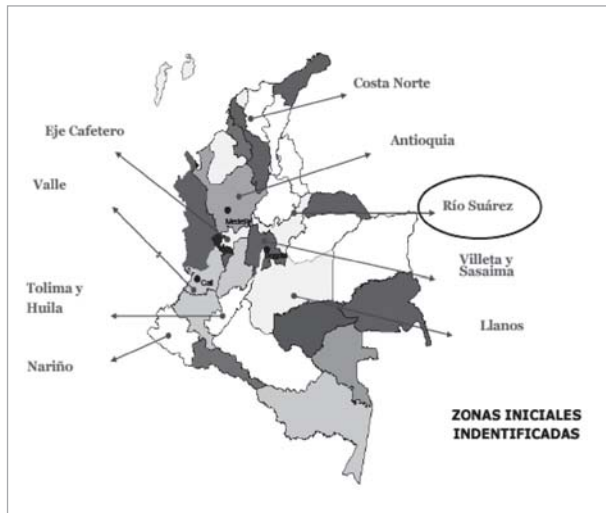
Figura 6. Histórico del área sembrada.

Fuente: Esta investigación. Elaborada a partir de datos reportados en: [18] visitado el 22 /11/ 2010

3.1. La Caña Panelera y los Agrocombustibles

La caña panelera es una de las materias primas con gran rendimiento con respecto a las demás para la producción de bioetanol 9000 L/Hect. Las zonas potenciales del país para su producción se resaltan en el Mapa 1.

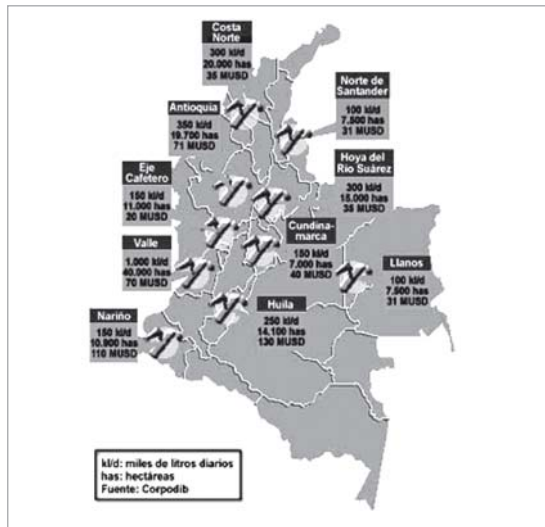
Para cada una de las zonas potenciales ECOPEPETROL realizó una aproximación de los miles de litros de bioetanol que se podrían producir por hectárea, mostrados en el mapa 2. Se destaca el departamento del Valle como el mayor productor con 1.000 miles de litros diarios por las 40.000 hectáreas de caña sembradas.



Mapa 1. Zonas potenciales de producción de Bio-etanol.

Fuente: Gráfico obtenido del documento "El cultivo de la caña panelera y la agroindustria panelera en el departamento de Santander" [20]

Datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia muestran que el cultivo de la caña ocupa actualmente 449.480 hectáreas en todo el país (con destino a la producción de azúcar y panela) generando 336.310 empleos (Tabla 1). La producción de caña panelera ofrece mayor demanda de empleo por persona en comparación con la caña de azúcar, para el año 2008 se emplearon en esta actividad un total de 287.506 personas que equivale al 85% de empleos totales para este sector económico.



Mapa 2. Producción en miles de litros por hectárea de Bioetanol por Departamento.
Fuente: Gráfico obtenido de ECOPELROL [21]

Uso	Área sembrada (ha) 2008	Empleos actuales	Área Potencial (ha)	Empleos adicionales 20% área potencial	Empleos adicionales 100% área potencial
Panela	243.816	287.506		119.286	596.428
Azúcar	174.263	41.275		21.050	105.252
Etanol	31.401	7.529	3.898.221	140.336	701.680
Total	449.480	336.310	3.898.221	140.336	701.680

Fuente: Esta investigación. Datos. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [21].

Sin embargo, si se utilizará el 20% del área potencial de cultivo de caña se tendrían 140.336 empleos nuevos y con el 100% el ministerio plantea que se obtendrían 701.680 nuevos empleos. Si se utilizara el 20% del área potencial como lo plantea del Ministerio se tendrían 119.286 empleos nuevos para el sector de la caña panelera el sector de la caña panelera y con el 100 % del área potencial sembrada en caña se garantizarían 596.428 empleos nuevos solo este sector [21].

3.2. Proyectos Actuales y en Construcción

Según datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de los proyectos de biocombustibles que ya están en marcha en Colombia [22], se produce 1,1 millones de litros diarios de etanol a partir de caña, cubriendo cerca del 70% de la demanda nacional¹, como se observa en la Tabla 2.

Por su parte los proyectos en desarrollo son presentados en la tabla 3, se espera que estos proyectos se conviertan en una solución para la sobreoferta de panela presentada

¹ Nótese que la sustitución actual de gasolina por bioetanol es del 5%.



durante los últimos años en Colombia, ver Tabla 3. De lograrse esta proyección se incrementaría la producción en 1.500.000 litros día convirtiéndose en un motor de desarrollo para las regiones.

Tabla II. Proyectos actuales de producción de Bioetanol

No.	Región	Inversionista	Capacidad (L/Día)	Absorción Azúcar Crudo (T/Año)	Área Sembrada (ha)	Empleos Directos	Empleos Indirectos
1	Miranda, Cauca	Incauca	250.000	97.690	11.942	2.171	4.342
2	Palmira, Valle	Ingenio Providencia	300.000	65.126	9.287	1.688	3.376
3	Palmira, Valle	Manuelita	250.000	81.408	8.721	1.586	3.172
4	Candelaria, Valle	Mayagüez	150.000	48.845	6.587	1.198	2.396
5	La Virginia, Risaralda	Ingenio Risaralda	100.000	32.563	3.004	546	1.092
6	Canta Claro, Puerto López	GPC	25.000	33.000	1.200	240	480
TOTAL en Producción			1.075.000	358.632	40.742	7.429	14.858

Fuente: Esta investigación. Datos Federación Nacional de Biocombustibles [22, 23, 24].

Tabla III. Proyectos en Desarrollo de producción de Bioetanol

Empresa	Región	Capacidad (L/Día)	Materia Prima	Año
BIONERGY	Puerto López – Puerto Gaitán, Meta	300.000	Caña	Julio 2012
MAQUILTEC	Tuta, Boyacá	300.000	Remolacha	2012
MERHAV S.A.	Pivijay – Magdalena	300.000	Caña	2012
ALCOHOL DEL RÍO SUAREZ	Barbosa, Santander	300.000	Caña	2012
AQA S.A.	Valle R. La Vieja, Quindío	150.000	Caña	2010
INGENIO MAYAGÜEZ (Ampliación)	Candelaria, Valle	150.000	Caña	Diciembre 2011
Total en Producción		1.500.000		

Fuente: Esta investigación. Datos Federación Nacional de Biocombustibles. [24, 25].

3.3. La influencia de agrocombustibles en los precios de la cadena productiva

La influencia de los agrocombustibles en el precio de los derivados de la caña, es un factor de gran importancia dado que este puede poner en riesgo su uso para la producción de alimentos humanos o animales. En el Figura 7 se muestra el comportamiento del precio internacional del azúcar crudo [25]², se evidencia cómo a partir del año 2002 tiene un crecimiento exponencial hasta el 2006 con un precio de 14,65 US\$cent /lb, luego de decender abruptamente a un precio de 9,91 para el 2007, nuevamente asciende a un precio de 17,78 en el año 2009. Podría pensarse que este comportamiento se debe en

² Precio promedio anual de los cierres diarios de la posición más cercana de la bolsa de Nueva York.

parte al uso de la caña de azúcar para producción de etanol a nivel mundial, dado que el consumo per cápita de azúcar no se ha incrementado significativamente.

Por su parte, el comportamiento de los precios de la panela, producto derivado de la caña panelera, es similar, como se observa en la Figura 8; entre el año 2005 al 2007 presentó un incremento de más del doble en su precio, pasando de 645 pesos por kilogramo, a 1.578 \$/kg siendo este su más alto en el periodo de 1998 al 2010. Luego de dos años de descenso 2008-2009, vuelve a repuntar el precio, presentando un valor promedio de 1052 para 2010.

El comportamiento de los precios presentado en las dos figuras anteriores merece un análisis detallado con el fin de identificar si los crecimientos de los precios están relacionados con el alto valor del precio del petróleo para el periodo. ECOPEPETROL reporta los datos del precio para el petróleo crudo WTI [23], plasmados en la Figura 9.

Se observa que luego de un continuo crecimiento del precio promedio del petróleo entre 1996-2008, alcanza en el año 2008 el más alto valor 99,72 USD/lb (en este año para junio alcanzo un valor de USD/lb). A partir del año 2008 el precio recae a un precio promedio de 61,83 USD/lb (39, 26

USD/lb en febrero). En el 2010 se presenta nuevamente una tendencia al alza con valores para noviembre de 85,02 USD/lb. Se infiere que definitivamente que la crisis económica mundial de los años 2008-2009 ha afectado el precio del petróleo generando una reducción significativa del precio, el cual se recupera en la medida que esta crisis se supera.



Figura 7. Comportamiento histórico de los precios internacionales de azúcar crudo.

Fuente: Esta investigación. Datos [26]

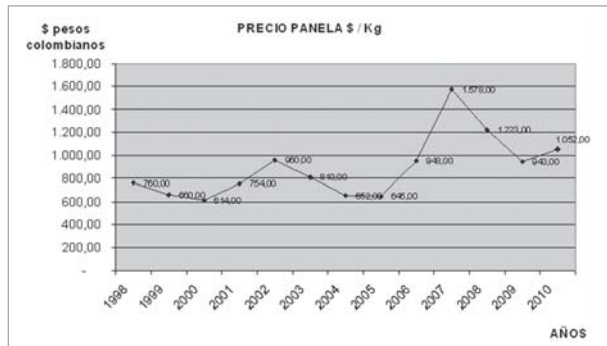


Figura 8. Comportamiento Histórico de los Precios de panela en Colombia.

Fuente: Esta investigación. Elaborada a partir de datos reportados en [27] y [18]



Figura 9. Indicadores Petróleo - USD/lb. Crudo TI NYMEX.

Fuente: Esta investigación. Elaborada a partir de datos reportados en [23, 24, 25]



Del comportamiento presentado en comparación de los Figuras 7, 8 y 9 se evidencia una dependencia entre el crecimiento del precio del petróleo y el del azúcar, aspecto influenciado por la entrada en producción de etanol a partir de materias primas derivadas del agro, el azúcar no es la excepción presenta el mayor crecimiento en los últimos cinco años. En este mismo sentido, en lo que respecta a la caña panelera, el crecimiento del precio de la panela está influenciado por los precios del azúcar, derivados este último del precio del petróleo, como se expresó anteriormente.

Algunos analistas de este fenómeno podrían atribuir el problema a las ineficiencias de la cadena de panela las cuales se han evidenciado en reportes de estudios previos [28]. No obstante, es claro que el precio de la panela ha tenido crecimientos inusitados, más no en la proporción de las ineficiencias de la cadena de abastecimiento de la cadena panelera en los últimos años.

El centro regional de estudios económicos de Santander, plantea que el alto nivel de intermediación no permite mantener una cadena eficiente. Por el contrario, está sujeto a un comportamiento cíclico acorde con el período productivo de la caña panelera y al efecto sustitución entre panela y azúcar [29]. Por su parte, el Ministerio de Agricultura plantea el patrón estacional de los precios de la panela en el mercado nacional, presentando picos de alto valor en mayo y más leves en noviembre y enero. Existen dos temporadas de precios, entre enero y julio con precios altos y entre agosto a diciembre los precios se deprimen [30].

De los análisis anteriores se infiere que, cuando los precios del azúcar aumentan se incrementa la producción de este bien y dada su influencia también aumenta la de caña panelera, con sus respectivo aumento de precio. De esta manera, el ciclo de precios y de producción de panela está determinado por el comportamiento de los precios y del mercado del azúcar, así como del petróleo, a lo anterior se suma el incremento en el uso de bio-etanol en la mezcla con gasolina para vehículos en Colombia.

De esta manera se plantea la necesidad de establecer el comportamiento futuro de la producción de caña panelera para lo que se evaluaron dos técnicas de pronósticos con el fin de proyectar las variables incidentes en la dinámica de la caña panelera. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente apartado.

3.4. Predicción de la producción de bioetanol mediante análisis estadístico

Para el análisis estadístico se emplearon dos técnicas, análisis multivariado y redes neuronales

3.4.1. Análisis por Regresión Múltiple

Para realizar este estudio se tuvo en cuenta información anual desde 1992 a 2006, de las siguientes variables: producción (ton x año), rendimiento (kg x hectárea), participación de la caña panelera en la valoración de la producción, participación del número de personas en el sector, variación y superficie cosechada (hectáreas).

El modelo de regresión múltiple contiene una variable dependiente, en este caso la

variable producción, que es la que se busca predecir, y las demás son las independientes. Los cálculos del modelo fueron realizados en SPSS y son presentados en la Tabla 4. El primer análisis incluye todas las variables. Los coeficientes de regresión denotan la magnitud del efecto que las variables independientes sobre la variable dependiente (en este estudio la producción). El modelo encontrado para la variable Y (producción) fue:

$$Y = -13382696.48 + (2129921) \text{ rendimiento} + (62742,15) \text{ participación} + (1581,34) \text{ variación} - (1310,01) \text{ No personas} + (62444,17) \text{ superficie}$$

Tabla IV. Estadísticas del Análisis de Regresión

R cuadrado (Coeficiente de Determinación)	0,9999
R cuadrado ajustada	0,9998
R Múltiple R (Coeficiente de Correlación Múltiple)	0,9999
Estimados de Error Estándar (SEy)	9972,32
Observaciones (n).	15

El Coeficiente de Determinación indica que el 0.99 de la variación en la variable *producción* puede explicarse mediante el análisis de regresión de las demás variables.

Por otra parte se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA), cuya prueba F mide las propiedades estadísticas de los coeficientes con los cálculos de las medias de los cuadrados de las regresiones y de las medias residuales de los cuadrados; mientras más grande sea la estadística F, más significativo será el modelo (ver Tabla 5).

En el estudio se rechaza la hipótesis nula, quiere decir que en conjunto los parámetros estimados no son iguales a cero, por tanto el modelo de regresión es significativo. Su pronóstico se presenta en las Figura 10 y 11.

Dado que en las pruebas de hipótesis en forma individual se encontró que los regresores de las variables independientes participación, variación y número de personas, no son significativos, se ejecutó un retroceso progresivo³. En el primero se examinó la superficie cosechada porque su parámetro es significativo, como lo muestra el resultado de la Tabla 6.

Tabla V. Análisis ANOVA

	Suma de los Cuadrados	Media de los Cuadrados	Estadística F	Valor P	Pruebas de Hipótesis	
Regresión	7001083884102,50	1400216776820,50	14079,99	0,0000	Estadística F Crítica (99% de confianza con df de 5 y 9)	6,0569
Residual	895025783,50	99447309,28			Estadística F Crítica (95% de confianza con df de 5 y 9)	3,4817
Total	7001978909886,00				Estadística F Crítica (90% de confianza con df de 5 y 9)	2,6106

Fuente: Esta investigación. Datos Federación Nacional de Biocombustibles. [24, 25].

³ Incluyendo variables independientes según aporte al modelo

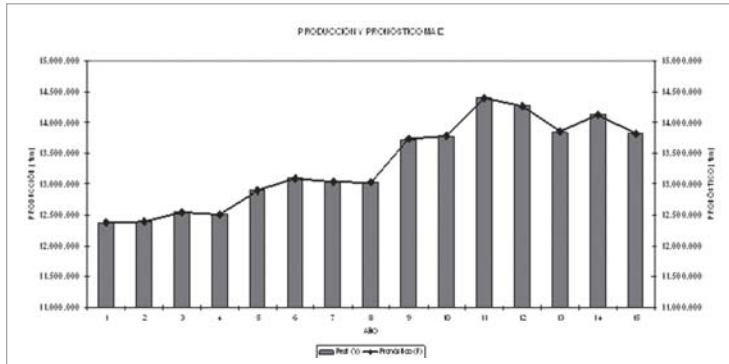


Figura 10. Validación del pronóstico: producción.

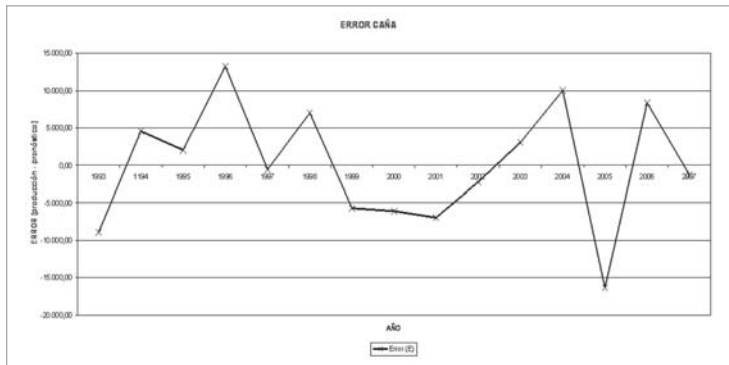


Figura 11. Error del pronóstico: producción.

Tabla VI. Estadísticas del Análisis de Regresión: Retroceso Progresivo (paso 1 de 2)

R cuadrado (Coeficiente de Determinación)	0,7900
R cuadrado ajustada	0,7739
R Múltiple R (Coeficiente de Correlación Múltiple)	0,8888
Estimados de Error Estándar (SEy)	336307,2469
Observaciones (n).	15

El Coeficiente de Determinación en este caso indica que el 0.79 de la variación en la variable *producción* puede explicarse y calcularse mediante el análisis de regresión de la variable *superficie cosechada*, cuyo modelo es el siguiente:

$$Y = -5830300.87 + (88850.52) \text{ superficie}$$

Una hectárea cultivada en el año implica una producción de 88.850 toneladas por año. Además se rechaza la hipótesis nula y el coeficiente de regresión de superficie se considera así, significativo (ver Tabla 7).

Como puede notarse los parámetros de la ecuación de regresión son significativos⁴ y para efectos de estimación este modelo sirve para realizar pronósticos según la tendencia (ver Figura 12 y 13).

⁴ El análisis de varianza la prueba estadística F se rechaza cuando se plantea la hipótesis nula es igual a cero para el parámetro de la variable superficie y la alterna al menos es diferente a cero.

Tabla VII. Resultados de la Regresión

	Intercepción	Superficie
Coefficientes	-5830300,8768	88850,5296
Error Estándar	12704,8363	2739612,5828
Estadística t	-2,1281	6,9934
Valor P	0,0530	0,0000
Inferior al 5%	-11748874,0145	61403,3995
Superior al 95%	116297,6596	88272,2608

Grados de Libertad		Pruebas de Hipótesis	
Grados de Libertad para la Regresión	1	Estadística Crítica t (99% de confianza con df de 13)	3,0123
Grados de Libertad Residual	13	Estadística Crítica t (95% de confianza con df de 13)	2,1604
Grados Totales de Libertad	14	Estadística Crítica t (90% de confianza con df de 13)	1,7709

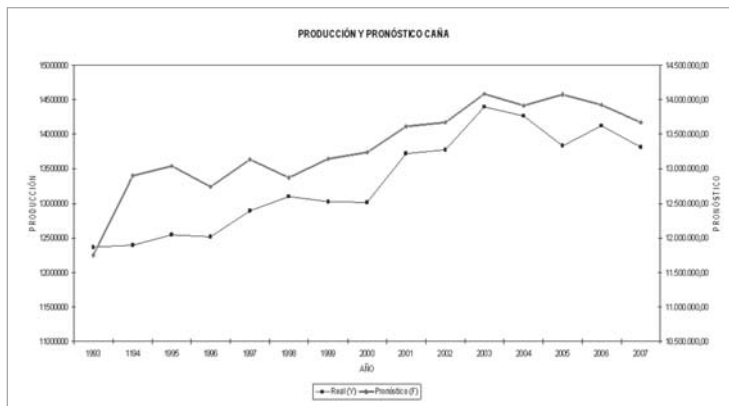


Figura 12. Validación de pronóstico, superficie cosechada.

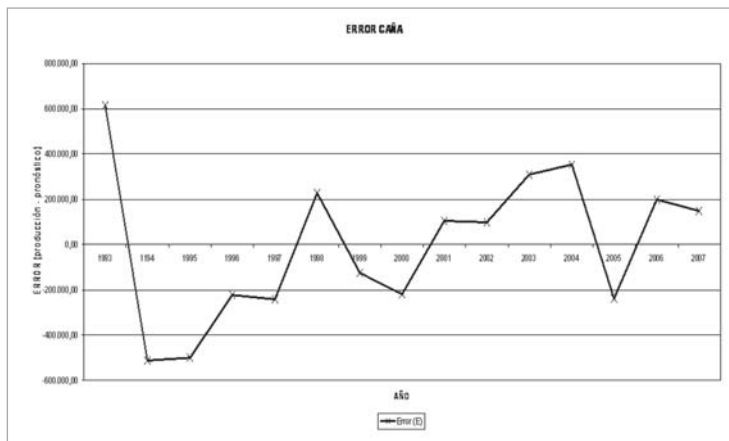


Figura 13. Error del pronóstico, superficie cosechada.

Seguidamente se consideró un segundo modelo de retroceso progresivo donde se realizó una nueva regresión con la variables independiente *superficie cosechada* (del anterior modelo) y adicionalmente la variable independiente *rendimiento*. Los resultados de este segundo análisis de retroceso progresivo se observan en la Tabla 8.



Tabla VIII. Estadísticas del Análisis de Regresión: Retroceso Progresivo (paso 2 de 2).

R al Cuadrado (Coeficiente de Determinación)	0,9998
R al Cuadrado Ajustada	0,9998
R Múltiple R (Coeficiente de Correlación Múltiple)	0,9999
Estimados de Error Estándar (SEy)	10469,8764
Observaciones n	15

En este caso el Coeficiente de Determinación indica que el 0.99 de la variación en la variable dependiente *producción* puede explicarse mediante la regresión de las variables independientes *superficie cosechada* y *rendimiento*. El modelo obtenido es el siguiente:

$$Y = -13502933 + 62421,72 (\text{superficie}) + 2163929,47 (\text{rendimiento})$$

Explicando el modelo significa que si el rendimiento permanece constante al cosechar una hectárea, la producción es de 62.421 ton. al año y si permanece constante la superficie, el rendimiento por kg. por hectárea es de 2.163.929 ton. por año. El pronóstico de este modelo se presenta en las Figuras 14 y 15.

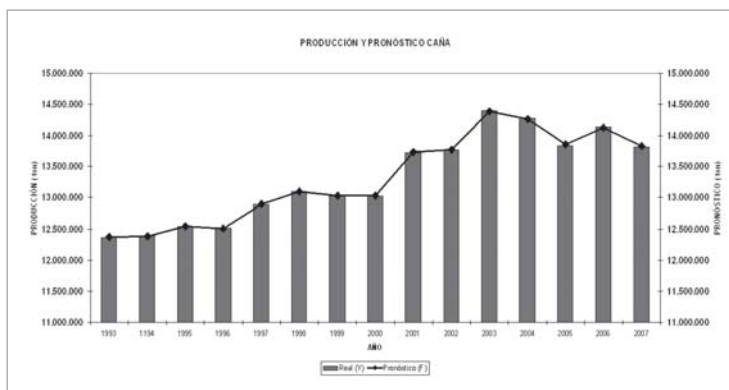


Figura 14. Validación del pronóstico, producción y superficie cosechada.

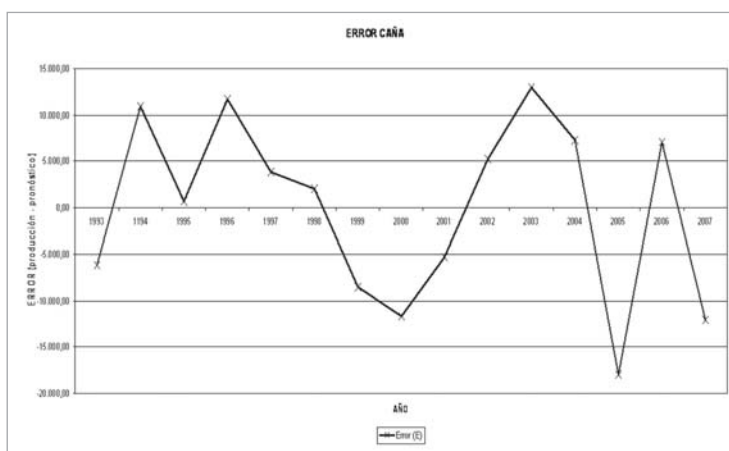


Figura 15. Error del pronóstico, producción y superficie cosechada.

Para validar el modelo se verificaron los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas y multicolinealidad. En la Figura 16 se presentan los pronósticos obtenidos con regresión múltiple.

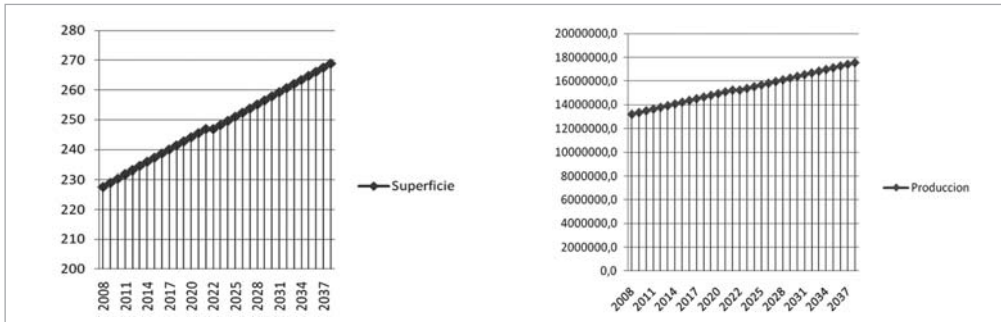


Figura 16. Pronóstico producción caña de panelera, regresión múltiple al 2038.

3.4.2. Pronóstico con Redes Neuronales.

El segundo método utilizado fue Redes Neuronales Artificiales (RNA). Esta es una técnica de Inteligencia Computacional considerada como aproximadores generales de funciones no-lineales cuya capacidad de predicción es sobresaliente. También han sido aplicadas a predicción de series de tiempo [31-36], el cual es el enfoque asumido en la presente investigación. Las características de la RNA utilizada son:

- Topología: Alimentación hacia adelante con retropropagación.
- Método de Aprendizaje: Gradiente Descendiente con vector de pesos.
- Método de Entrenamiento: Algoritmo de Levenberg-Marquardt.
- Criterio de Entrenamiento: Error Cuadrático Medio (MSE).
- Número de Capas: 3.
 - o Capa1: 10 Neuronas Lineales.
 - o Capa2: 5 Neuronas Lineales.
 - o Capa 3: 1 Neurona Lineal.
- Criterio de parada: Aproximación a cero MSE.

El pronóstico obtenido mediante redes neuronales, es similar al obtenido mediante regresión múltiple, por lo tanto, este pronóstico se ratifica.

Para cada variable se utilizó su variación diaria, definida como $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$, predicha utilizando 3 autorregresiones $\Delta y_{t-1}, \Delta y_{t-2}$ y Δy_{t-3} y 2 promedios móviles ∇y_{t-1} y ∇y_{t-2} .

Los resultados de 141 iteraciones para la variable producción de caña panelera se observan en la Tabla 9.

Tabla IX. Resultados de pronóstico con RNA. Resumen Variable Caña Panelera			
Periodo	Número de Datos	Pronóstico año 2009	MSE
1987-2008	18	129347	0.00012323



Dado que el pronóstico obtuvo un error pequeño, se considera que el modelo de predicción aprendido por la RNA es bastante aproximado. Lo anterior se corrobora con los gráficos del valor pronosticado frente al real y el comportamiento del error (Figuras 17 y 18). Estos a su vez fueron evaluados mediante la siguiente evidencia estadística.

- Pruebas de aleatoriedad que confirman la independencia del error:
 - P-value Prueba de Rachas: 0.694
 - P-value Test de Portmanteau: 0.251
- Pruebas de normalidad que confirman que el error se comporta de manera normal:
 - P-value Shapiro Wilks: 0.363
 - P-value Anderson Darling: 0.212
- Pruebas de correlación que confirman que los errores no están correlacionados:
 - P-value ARCH (3 Rezagos): 0.001
 - P-value Ljung-Box (5 Rezagos): 0.012

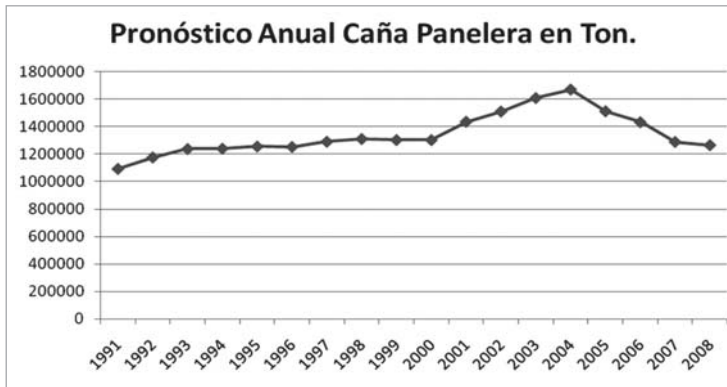


Figura 17. Validación del pronóstico, producción y superficie cosechada.

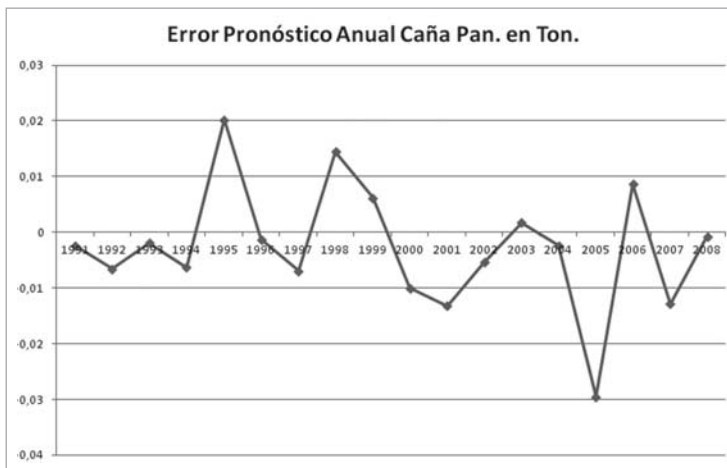


Figura 18. Error del pronóstico, producción y superficie cosechada.

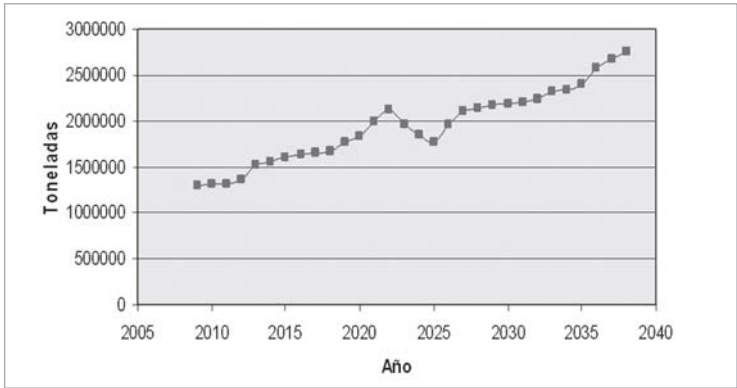


Figura 19. Pronóstico producción caña de panelera, redes neuronales al 2038.

Además se encuentra que el pronóstico obtenido mediante redes neuronales, es similar al obtenido mediante regresión múltiple, por lo tanto, este pronóstico se ratifica.

Luego de establecer el posible comportamiento cuantitativo de futuras producciones, se hace necesario estudiar el comportamiento del sistema incluyendo las políticas agroalimentarias, energéticas y de contaminación.

3.5. Dinámica del sistema.

Dado el número de variables que intervienen en el comportamiento de la producción de bioetanol a partir de caña panelera y con el fin de entender la dinámica y la influencia en la seguridad alimentaria, se planteó un modelo basado en dinámica de sistemas; a continuación se presenta su modelo causal así como la explicación detallada de cada uno de los ciclos de retroalimentación. El propósito es determinar la demanda potencial de bioetanol que suplirá la demanda de este combustible en el parque automotor colombiano y establecer que implicaciones puede tener la sobreproducción de bioetanol a partir de caña panelera en el medio ambiente y la seguridad alimentaria nacional.

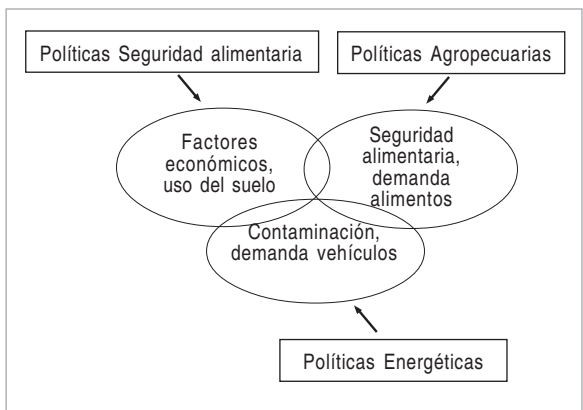


Figura 20. Factores fundamentales en la dinámica del sistema.

Los factores más influyentes en la dinámica del sistema se observan en la Figura 20. El primero está relacionado con la contaminación derivada del uso de combustibles fósiles, a su vez asociada a las políticas energéticas que determinen la sustitución de gasolina por bioetanol, obteniendo una mezcla cada vez mayor hasta un 20-80% respectivamente para el año 2012. Influye aquí la demanda de combustible por parte de los vehículos.



El segundo factor es el relacionado con la cantidad demandada de alimentos para consumo humano, esto se refleja en las políticas de seguridad alimentaria, aquellas encaminadas a no poner en riesgo la disponibilidad de alimentos humanos en Colombia.

El tercer factor está relacionado con estímulos económicos, en el que es relevante la intención de los productores para la utilización del suelo en producción de materias primas para agrocombustibles y no para alimentos.

El diagrama causal presentado en la Ilustración 1, muestra el comportamiento de las principales variables relacionadas en el modelo y la interacción entre ellas (el diagrama fue obtenido utilizando la herramienta de modelado y simulación IThink).

El Ciclo de Demanda de Combustible se ve afectado por el incremento de la Demanda del Parque Automotor que a su vez está determinado por el nivel de ingresos, el aumento de la población y su relación directa con el Empleo.

La oferta de Gasolina está limitada a causa de la escasez de reservas de petróleo, incide el incremento de los precios y la estimulación del gobierno por la producción y comercialización de biocombustibles con el fin de asegurar el abastecimiento energético y la promoción de energías amigables con el medio ambiente.

La Demanda de Etanol y Producción de Etanol relacionadas con la actual capacidad productiva con base en las plantas productoras que se encuentran a lo largo del territorio colombiano y los proyectos que están en curso permiten determinar si esta capacidad es suficiente para cubrir la demanda de combustible o la necesidad de crear e implementar nuevos proyectos, con el fin de aumentar la producción de bioetanol en el país.

La producción de Panela, No. Hectáreas para Caña Panelera, las Hectáreas Disponibles para Agricultura forman diversos ciclos de retroalimentación positiva.

A medida que el consumo de panela se incremente y los precios sean benéficos para el productor se garantiza que el uso del suelo (Ha. Disponibles para agricultura) sea para la demanda de alimentos; pero si los ingresos para el productor son más altos al utilizar la tierra (uso agropecuario) en cultivos para la producción de bioetanol se verá afectada la seguridad alimentaria. Se contempla el efecto generado por disminución de la población a causa del aumento de las enfermedades por desnutrición y si las Políticas y Leyes alimentarias son limitadas, el incremento de las muertes; por ende la incidencia en la mortandad de la población y la afectación directa.

4. Conclusiones

Es evidente que el área de sembrada para caña panelera en el país no se ha incrementado, más bien se ha mejorado el rendimiento por hectárea. No obstante los pronósticos obtenidos por dos técnicas diferentes evidencian el futuro crecimiento de la producción de caña panelera, y por ende el incremento de demanda de suelo.

Por otra parte, los precios de la panela se han incrementado al parecer por consecuencia de la producción de bioetanol, el crecimiento del precio del petróleo, azúcar y la aparición de nuevos proyectos de producción de agrocombustibles con caña materia prima.



5. Referencias Bibliográficas

- [1] Worlwatch Institute. (2006). Biofuels for transportation: Global potencial and implications for sustainable agriculture and energy in 21st century. Consultado: www.wordwatch.org/node/4078. (5 de enero, 2011).
- [2] Altieri, Miguel y Bravo, Elizabeth. (2007). La tragedia social y ecológica de la producción de agrocombustibles en el continente americano. Consultado: www.foodfirst.org/files/altieri-Bravo_biocombustibles-ES.doc. (8 de junio, 2007).
- [3] Trade, climate change and energy, ICTSD. (2006). Jonson, F., et al. Bio-ethanol from sugarcane and sweet sorghum in southern Africa: agroindustrial development, import substitution and export diversification. Consultado: www.trade-environment.org/output/resource/energy_issuebriefs.pdf. (6 de junio, 2006).
- [4] CEPAL. (2007). Biocombustibles y su impacto potencial en la estructura agraria, presiones y empleo en América latina. Serie de desarrollo productivo. Consultado: www.eclac.org/cgibin/geetProd.asp?xml=/publicaciones/xml5. (8 de junio, 2007).
- [5] Agrocombustibles (2007). Honty, G. y Gudinas, E. Agrocombustibles y desarrollo sostenible en el Caribe. Observatorio de desarrollo. Consultado: www.agrocombustibles.org/conceptos/agrocombustiblesclasesodeld07.pdf. (8 de junio, 2007).
- [6] Rodríguez, I., Orjuela, J. (2010). Panorama de las Políticas y leyes del gobierno frente a la producción de alimentos agropecuarios y de producción de agrocombustibles. *Estudios en derecho y gobierno, Vol. 2. No 2. Universidad Católica de Colombia*. 84-98.
- [7] Secretaría del Senado, República de Colombia. (2011). Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y Sentencias de Constitucionalidad. (ISSN 1657-6241). Consultado: <http://www.secretariassenado.gov.co>. (1 de febrero, 2011).
- [8] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (1996). Cumbre Mundial de Alimentos, proyecto de declaración y plan de acción, 13-17 de noviembre de 1996 Roma, Italia. Consultado: http://www.fao.org/docrep/X2051s/X2051s00.htm#P304_35899. (2 de febrero, 2011).
- [9] Machado, A. C. (2003). Ensayos sobre seguridad alimentaria. *Universidad Nacional de Colombia, Red de desarrollo rural y seguridad alimentaria*.
- [10] Braun, J. (2007). Food-Security Risks Must Be Comprehensively Addressed 2008-2009 Annual Report. *Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias*.
- [11] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (2008). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Biocombustibles, perspectivas, riesgos y oportunidades. Consultado: <http://www.fao.org/publications/sofa-2008/es/>. (2 de febrero, 2011).
- [12] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (2008). The State of Food and Agriculture 2008 Biofuels: prospects, risks and opportunities. *Rome 7 October 2008*.
- [13] Mosquera, M. P. Artículo (2008). Empresa y Energías Renovables. *Fundación Confemetal*.
- [14] Ojeda, Y. (2009). Seminario taller Biocombustibles. *Congreso Biodiesel-Bioetanol. Universidad Nacional de Colombia. Ponencia: Panorama de las tecnologías para la producción de Biodiesel*.
- [15] Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (2011). **Brasil, Argentina y Colombia lideran producción de biocombustibles en la región, según estudio de CEPAL**. Consultado: <http://www.fedebiocombustibles.com>. (2 de febrero, 2011).
- [16] Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (2010). El ABC de los Alcoholes Carburantes. Consultado: <http://www.fedebiocombustibles.com>. (10 de febrero, 2010).
- [17] Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. (2011). Consultado: <http://faostat.fao.org/site/612/default.aspx#ancor>. (15 de enero, 2011).
- [18] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, República de Colombia. (2011). Agronet. Consultado: <http://www.agronet.gov.co/agronetweb/AnalisisEstadisticas/tabid/73/Default.aspx>. (15 de enero, 2011).
- [19] Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. (2011). Consultado: <http://www.dnp.gov.co/>. (15 de enero, 2011).
- [20] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, República de Colombia. (2008). Centro regional de estudios económicos Bucaramanga. *Documento de trabajo El cultivo de la caña panelera y la agroindustria panelera en el departamento de Santander*. Consultado: <http://www.minagricultura.gov.co/02componentes/05biocombustible.aspx> (n.d.).
- [21] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO COLOMBIA. (2011). Castello, L. FAO COLOMBIA 2008. Consultado: <http://coin.fao.org/cms/world/colombia/es/Paginalnicial.html> (2 de mayo, 2011).
- [22] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, República de Colombia. (2011). Políticas y Programas Misionales Empresarialización de Actividades Agropecuarias. Consultado: <http://www.minagricultura.gov.co/02componentes/05biocombustible.aspx>. (n.d.).
- [23] Federación Nacional de Biocombustibles FEDEBIOCOMBUSTIBLES. (2011). Plantas productoras de Etanol en funcionamiento. Consultado: <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-270.htm>. (2 de mayo, 2011).
- [24] Federación Nacional de Biocombustibles FEDEBIOCOMBUSTIBLES. (2011). Plantas productoras de Etanol - Proyectos. Consultado: <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/proyecto-web-id-18.htm>. (2 de mayo, 2011).
- [25] CORPOICA. (2007). Estrategia de desarrollo de biocombustibles: Implicaciones para el sector agropecuario. Consultado: <http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/Convenio/Documentos/EstrategiaDesarrolloBiocombustiblesColombia.pdf>. (2 de noviembre, 2010).
- [26] SUGARINFO. (2011). Sugaronline Prices page. Consultado: http://www.sugarinfo.co.uk/home/website_contents/prices/ (05/2011).
- [27] Federación Nacional de Productores de Panela FEDEPANELA (2011). Precios Promedios Históricos al Productor. Consultado: <http://www.fedepanela.org.co/images/prehist.jpg> (5 de mayo, 2011).
- [28] Orjuela, J. A., Chavarría, I. A., y Calderón, M. E., (2010). Caracterización de la cadena de abastecimiento de panela para la provincia del Bajo Magdalena – Cundinamarca. *Artículo en publicación. Revista Científica, CIDC Universidad Distrital, 2011*.

- [29] Banco de la República, Colombia. (2008). Centro regional de estudios económicos Bucaramanga. Consultado: http://www.banrep.gov.co/documentos/publicaciones/pdf/sant_1.pdf (n.d.)
- [30] La Cadena Agroindustrial de la Panela en Colombia. (n.d.) Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) en la producción de caña y panela. *Documento de trabajo N.º 103*. Consultado: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1525s/a1525s07.pdf>. (n.d.)
- [31] Kuo, Ch. R., (1995). Artificial Neural networks vs. conventional methods of forecasting. *The Journal of Business Forecasting Methods & Systems*. Winter 1995/1996. 14, 4; 1
- [32] McMenamin, J. S. (1997). A primer on neural networks for forecasting. *The Journal of Business Forecasting Methods & Systems*. Fall 1997; 16, 3. 17.
- [33] Rummelhart, D. E., Widrow, B., y Lehr, M. A. (1994). The basic ideas in neural networks. EEUU, *Association for Computing Machinery. Communications of the ACM*. Mar 1994; 37, 3. 86.
- [34] Figueroa G., J.C. (2007). A comparison of ANFIS, ANN and DBR systems on volatile time series identification. *Proceedings of NAFIPS, IEEE. Conferences*. 319 - 324.
- [35] Figueroa G., J.C. (2009). An Interval Type-2 TSK Fuzzy Logic System for Volatile Time Series Identification. *Proceedings of the SMC, IEEE. Conferences*. 666 - 671.
- [36] Figueroa G., J.C. (2010). A Neuro-Evolutive Interval Type-2 TSK Fuzzy System for Volatile Weather Forecasting. *Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6216*.
- [37] Franco, C., Flórez, A., y Ochoa, M. (2008). Análisis de la cadena de suministros de biocombustibles en Colombia. En: *Revista de Dinámica de Sistemas Vol. 4, No. 2*. 109 - 133.

Javier A. Orjuela C.

Ingeniero de Alimentos, Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Maestría en Investigación de Operaciones y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Se desempeña como Subdirector de Abastecimiento Alimentario en la Secretaría de Desarrollo Económico en los años 2007-2008. Líder proyectos relacionados con el Plan Maestro de Abastecimiento y Seguridad Alimentaria en Bogotá Colombia, Se desempeña como Docente en el área de logística Universidad Distrital FJC desde 1997, en la Universidad Católica como Docente en el área de Investigación de Operaciones y Producción desde 1999 y en otras universidades colombianas en nivel de posgrados en las áreas de Logística, Producción y gestión de Proyectos en Bogotá y Colombia. Líder del Grupo de Investigación en gestión industrial GEGI que realiza estudios sobre modelos de gestión industrial y sectorial. Líder del Grupo de Investigación en Logística, Trazabilidad y Cadenas de Abastecimiento.

Isaac Huertas F.

Estadístico de la Universidad Nacional, Bogotá, Colombia. Maestría en Investigación de Operaciones y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Se desempeña como Gerente de operaciones Banco de Colombia por más de 10 años. Se desempeña como Docente en la Universidad Católica en el área de Investigación de Operaciones y Estadística por más de 25 años y en otras universidades colombianas a nivel de posgrados en las áreas de Investigación de Operaciones y Estadística. Investigador en el Grupo de Investigación en gestión industrial GEGI, que realiza estudios sobre modelos de gestión industrial y sectorial.

Juan C. Figueroa

Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Se desempeña como Docente en el área de Investigación de Operaciones Universidad Distrital FJC desde 2006. Investigador del Grupo de Investigación en Producción GIP e investigador del grupo de investigación en Modelos Matemáticos aplicados a la Industria MMAI, que realizan estudios sobre producción.

Dusko Kalenatic

Ingeniero diplomado en organización del trabajo Universidad de Belgrado Serbia. Obtuvo su doctorado en Ciencias Técnicas en la Universidad Central de las Villas, Cuba. Se desempeña como Docente en el área de Investigación de Operaciones Universidad Católica por más de 20 años. Líder e investigador del Grupo de Investigación en Producción GIP, e investigador en el grupo de Sistemas Logísticos, que realiza estudios sobre producción y logística.

Katherine Cadena

Ingeniera Industrial de la Universidad Católica Colombia. Se desempeña como supervisora de producción en la Campiña, Bogotá, Colombia. Es Investigador del Grupo de Investigación en gestión industrial GEGI que realiza estudios sobre modelos de gestión industrial y sectorial.