

**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE DIVERSIFICACIÓN DE ZONAS
PRODUCTORAS DE CAÑA DE AZÚCAR POR METODOLOGÍAS
EMERGY, ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y EVALUACIÓN
MULTICRITERIO**

**ANALYSIS OF DIVERSIFICATION CAPACITY OF SUGARCANE SUPPLY
ZONES BY EMERGY, LIFE-CYCLE ASSESSMENT AND MULTICRITERIA
EVALUATION METHODOLOGIES**

N. Aguilar-Rivera^{1}, J. E. Houbbron² y R. A. Espinosa-López¹*

¹ Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

² Facultad de Ciencias Químicas. Región Orizaba-Córdoba Veracruz México

Recibido: Febrero 28, 2014; Revisado: Marzo 15, 2014; Aceptado: Marzo 31, 2014

RESUMEN

La agroindustria azucarera es una actividad productiva de alto impacto social, económico y espacial sin embargo, los retos de competitividad global requieren la disminución de costos y la diversificación del uso de la caña de azúcar y subproductos de procesamiento, por lo tanto, para su implementación extensiva éxitos requiere ser abordada metodológicamente con técnicas multidisciplinarias para inventariar, evaluar y planificar los recursos, insumos, tecnología, energía, calidad de la materia prima e impactos ambientales que incluya la agricultura diversificada y proyectos de biorefinería. El objetivo del trabajo fue evaluar la aplicación de metodologías Emergy, Ciclo de Vida y Evaluación Multicriterio para el análisis de la capacidad de diversificación de zonas cañeras. Los resultados establecen que la aptitud agroclimática al cultivo es el factor más importante para el establecimiento de proyectos de diversificación en unidades productivas al explicar el 38,1 % y determina la capacidad del territorio para producir materia prima, en cantidad y calidad. Para el sistema de producción de etanol el principal contribuyente energético y ambiental es la etapa agrícola, que representa el 83% de todos los flujos, la etapa industrial 15% y el transporte de caña de azúcar 2%. Cuando se considera la cadena completa, los recursos de la economía y materiales (36,7%) y servicios (26,9%) fueron los principales flujos energéticos del sistema.

Copyright © 2014. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: N. Aguilar-Rivera, E-mail: naguilar@uv.mx

Sin embargo, de forma individual la principal contribución fue de lluvia (28%), fertilizantes y pesticidas (20%), mientras que los combustibles fósiles (6%), trabajo, ya sea contratado o temporal, contribuyó con 10% de los flujos energéticos.

Palabras clave: Zonas de abasto cañero, metodologías multidisciplinarias, sustentabilidad.

ABSTRACT

The sugar industry is a productive activity of high social, economic and spatial impact; however, the challenges of global competitiveness require cost reduction, sugarcane diversification and processing of by-products. For its successful and extensive implementation, it is necessary to be methodologically addressed with multidisciplinary techniques to inventory, assess and to plan the resources, inputs, technology, energy, raw material quality and environmental impacts including diversified sugarcane agriculture and biorefinery projects. The objective was to evaluate the application of Energy methodologies, Life Cycle Assessment (LCA) and Multi-Criteria Evaluation (MCE) for the analysis of capacities diversification of sugarcane supply areas. The results established that the agroclimatic suitability is the most important factor for diversification projects establishment in sugarcane farms when explaining the 38.1% and determines the capacity of land to produce quantity and quality raw material. In ethanol production the major energetic and environmental impact is by the agricultural stage which represents 83% of all flows, 15% industrial stage and 2% sugarcane transport. When we consider the entire chain, economic resources and materials (36.7%) and services (26.9%), they were the main energy flow in the system. However, individually, the main contribution were rain (28%), fertilizers and pesticides (20%), while fossil fuels (6%), labor, whether hired or temporary, contributed 10% of the flows energy.

Key words: sugarcane supply zones, multidisciplinary methodologies, sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

La agroindustria azucarera es uno de los sectores productivos más importantes por la obtención de un producto básico para la alimentación humana de alta calidad y pureza, por su contribución con la generación de empleo especialmente en las áreas rurales, con el desarrollo sostenible y las economías nacionales. Sin embargo, el aumento progresivo de los costos de producción de campo, cosecha y fabricación de azúcar en el sector azucarero, los retos de competitividad global (productividad, diversificación, innovaciones, gestión, I+D+I etc.), el necesario desarrollo de proyectos de biorefinería, diversificación y reconversión productiva en centrales o ingenios azucareros destilerías y unidades de producción cañera y los impactos ambientales en suelo aire y agua de esta agroindustria hacen necesaria la búsqueda de nuevas alternativas de producción eficaz, de nuevo conocimiento y el desarrollo de nuevas tecnologías que contribuyan significativamente a su sostenibilidad, las cuales incluyan el establecimiento de nuevos sistemas de producción de caña de azúcar, más rentables y de menores costos y nuevos

enfoques de estructura organizacional y análisis del sector para la formulación de alternativas de acción a mediano y largo plazo y políticas públicas diferenciadas, es decir, reformas políticas, inversiones con fines específicos y la reorganización de aspectos clave a lo largo de la cadena productiva azucarera considerando a su vez aspectos de gran controversia política y social acerca de los patrones de propiedad de la tierra, las tradiciones agrícolas, los derechos de los campesinos y laborales, y la estructura agroindustrial (Aguilar, 2012 y Basanta, 2007)

Por lo tanto, los estudios de diversificación en regiones cañeras, unidades productivas e ingenios o centrales azucareros y destilerías, requieren ser abordados metodológicamente con técnicas multidisciplinarias para inventariar, evaluar y planificar los recursos por medio del análisis de variables que expliquen niveles de empleo, rentabilidad, precios, insumos, tecnología, energía y calidad de la materia prima e impactos ambientales que incluya la agricultura diversificada, la propagación de nuevos cultivos y otros proyectos en el ingenio azucarero como biorefinería mediante acciones simples para la sostenibilidad.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA. ANTECEDENTES

El reto más importante es hacer de la caña de azúcar una fuente para solucionar tres problemas esenciales: la alimentación, la energía y el medio ambiente, es decir, *“Lograr su procesamiento óptimo para obtener, además de sacarosa de distintas variedades, mayor cantidad de caña de azúcar y subproductos para su uso en una biorefinería como producción diversificada”* (Brambila, 2013). Por lo tanto, el sector agroindustrial azucarero requiere proyectos de reordenamiento y reconversión, tanto en la cuestión tecnológica sustentado en la diversificación de la producción y la administración industrial y empresarial en toda la cadena de valor; ya que son numerosos los factores que pueden evaluarse y establecer que han restringido y/o fomentado la diversificación y reconversión de la agroindustria azucarera en biorefinerías (precios del azúcar y petróleo, tecnología, legislación, calidad y cantidad de materias primas, subproductos y tecnología de conversión, costos de producción, insumos e impacto ambiental etc.) en un contexto de seguridad alimentaria, y que se han traslapado cíclicamente a través de la historia del edulcorante y la actual estructura productiva de la agroindustria azucarera en la mayoría de los países productores. Lo anterior debe contemplar la creación y uso de los derivados de la caña para la industria y la creación de proyectos locales o regionales en el ámbito rural (Aguilar, 2011)

En relación a lo anterior, Cespón (2008) concluyó que para la diversificación agroindustrial de la caña de azúcar y el fomento de su uso como materia prima, debe garantizarse un flujo material estable, en cantidad y calidad del campo cañero y el aprovechamiento industrial posterior de los residuos o subproductos. Es decir, para Waclawovsky *et al.* (2010) la obtención de altos rendimientos es la clave para el desarrollo de cultivos energéticos como la caña de azúcar y la generación de subproductos agrícolas que permitan la sostenibilidad y eviten la competencia con la producción de alimentos, por lo tanto, un incremento en la producción de etanol u otros derivados de la caña de azúcar, sin disminución de la producción de azúcar, debe ser logrado mediante el incremento del rendimiento existente en los cultivos de caña de

azúcar. En este sentido, Franco (2008) mencionó que para evaluar el potencial de producir derivados de caña de azúcar en los ingenios azucareros, destilerías o en la unidad productiva agrícola, como un proyecto sumamente complejo, en términos de rendimiento y de balance energético, con determinantes de orden económico e impactos ambientales por disposición de residuos y prácticas tecnológicas y culturales de producción y manejo, se requiere determinar el potencial actual y la expansión espacial potencial y necesaria del sector caña de azúcar. Lo anterior debe tener en cuenta a las múltiples variables relacionadas con dicho crecimiento mediante el uso de técnicas de gestión ambiental y análisis espacial. Esto permitirá integrar todos los aspectos relevantes a considerarla agroindustria azucarera como sistema socioeconómico (SES) en la decisión de diversificarse, al tener una visión espacial de los insumos aplicados y los factores limitantes de gran dispersión espacial e impacto (sociales, culturales, económicos, energéticos, biológicos, climáticos, geofísicos, etc.).

Por otro lado, Bergquist et al. (2012) proponen para incrementar la sustentabilidad de la producción aplicar programas de diversificación en predios cañeros mediante la interacción y retroalimentación de insumos y subproductos para la incorporación de aves de corral, ganado de doble propósito, otros cultivos y forrajes dentro de la unidad productiva cañera.

En este sentido, la verdadera competitividad azucarera se mide por la productividad y para el objetivo de ser competitivo es necesario identificar las áreas de oportunidad en campo, ingenios y comercialización considerando una política diferenciada según cada región cañera y cada ingenio y el uso de factores de producción inductores y promotores de productividad así como la renovación del campo cañero, minimización del impacto ambiental, derivado de la producción de caña de azúcar y la composición y volumen de la generación de subproductos (residuos de cosecha, jugos, bagazo, melaza, cachaza, bagacillo, cenizas, etc.), modernización de los ingenios azucareros, el redimensionamiento y diversificación del aprovechamiento de la caña de azúcar coproductos y subproductos, el abastecimiento de las necesidades locales domésticas e industriales y exportando más valor agregado sin depender exclusivamente del mercado interno y el de los países desarrollados para la exportación de los excedentes de azúcar que se presentan dependiendo si las condiciones naturales climáticas limitantes son favorables; y también se hace necesario normar los procesos y evaluar el ciclo de vida de los recursos por su relación con la sostenibilidad ambiental social y económica y evitar así los riesgos potenciales del aumento doméstico del precio de azúcar y la pérdida de competitividad internacional.

Es decir, la agroindustria azucarera necesita identificar el potencial o capacidad mediante la valoración de los recursos y capacidades que posee o a los que puede acceder (tamaño y tipo de explotación y productores, ubicación geográfica, variedades comerciales mejoradas, crédito riego, energéticos y otros insumos y sus impactos ambientales etc.). Al considerar estas variables podrían visualizarse escenarios locales y regionales y un impacto positivo en la viabilidad económica para la producción de nuevos compuesto derivados mediante la ingeniería metabólica o biosíntesis (Campillo, 2009; Birch, 2007; Higgins et al., 2007 y Mirkov et al., 2006).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la aplicación de metodologías de gestión ambiental como eMergy, Ciclo de Vida (LCA) y Evaluación Multicriterio (EMC) para el análisis de la capacidad de diversificación de zonas productoras de caña de azúcar.

3. ECONOMÍA ECOLÓGICA Y METODOLOGÍAS

Los problemas de la agroindustria azucarera son multicausales, multidisciplinarios, dinámicos, y el problema rebasa el componente ecológico y tecnológico, abarcando el social y el económico de complejidad tal que su análisis debe ser dirigido a través de un proceso permanente de administración estratégica desde una perspectiva interdisciplinaria. Así un paso fundamental para maximizar las oportunidades y las ventajas comparativas y competitivas regionales basadas en la diversificación o reconversión productiva, es dar seguimiento a los procedimientos de evaluación como instrumentos decisivos para la toma de decisiones. En este sentido, la Economía Ecológica es una ciencia que usa la Teoría General de Sistemas, la Ecología Sistémica, y la Termodinámica de los Sistemas Abiertos para analizar la realidad, explicitar su complejidad y mostrar su dinámica a través de diversas metodologías como Emergey o síntesis emergética, Análisis de ciclo de vida (LCA) y Evaluación Multicriterio (EMC) entre otros. En la agroindustria azucarera el objetivo de estas metodologías de gestión ambiental es analizar la producción de caña de azúcar con criterios energéticos para identificar sistemas más sustentables con menos insumos y emisiones identificando las etapas de plantación, cultivo, cosecha y transporte en caña planta y soca, y cultivo, cosecha y transporte, así mismo llevando a cabo un inventario de insumos energéticos usados convertidos a su equivalente en energía y valores de eficiencia energética comparando sistemas de tipo tradicional (cosecha integral con quema, plantación manual y uso de agroquímicos), de caña verde (cosecha integral sin quema, plantación manual, uso de rastrojos para cobertura y biofertilizantes), energético (cosecha integral sin quema, plantación mecánica, y uso de cachaza y biofertilizantes) y ecológico para la producción de panela (Aguilar, 2011). Es decir, el problema operativo principal de la multifuncionalidad de la agricultura cañera diversificada es valorar sus diferentes funciones pues la mayor parte de estas funciones corresponden a bienes o servicios no comerciales, que no tienen un precio especificado en el mercado, lo que significaría la necesidad de disponer de indicadores que permitieran comparar con otros componentes o indicadores para el análisis de las características técnicas, ambientales, energéticas y socioeconómicas.

3.1. Evaluación Multicriterio (EMC)

Aguilar (2011) propuso abordar la complejidad de determinar la capacidad de diversificación de áreas cañeras mediante una metodología multicriterio integrada en tres fases de evaluación para la obtención de un indicador compuesto denominado *índice de diversificación de zonas cañeras* de acuerdo a lo concluido por Tenerelli (2008). La primera (Fase I) se basa en un modelo espacial de asignación de uso y aptitud del suelo de forma general al cultivo de caña de azúcar; la segunda (Fase II) se basa en un modelo de evaluación del cultivo con fines energéticos o de diversificación

productiva. La agregación de las dos fases en una matriz multicriterio de acuerdo al método de Saaty (1990) ofrece un escenario final para evaluar la aptitud de tierras (zonificación) o potencial para proyectos de diversificación y otros usos (Fase III). El modelo clasifica las tierras de diferente aptitud en una tipología (zonificación) en función de su capacidad para establecer proyectos de diversificación. Estas limitaciones están relacionadas con las características morfológicas de la tierra, el uso del suelo, las restricciones ambientales y los criterios de gestión. Es decir, el método se lleva a cabo con la construcción de la estructura jerárquica (Figura1), la normalización de los factores, la ponderación y combinación con sus pesos, el diseño de la matriz de Saaty (matriz de comparación por pares), la determinación del índice de diversificación y por último la generación de mapas de caracterización de la zona de abasto cañero y de aptitud o índice de diversificación. Inicialmente, los factores deben ser seleccionados con base en su relevancia a escala local y regional para la adecuación de tierras de cultivo cañera para proyectos de diversificación en la unidad productiva y en la disponibilidad de bases de datos.

Es decir, mediante esta metodología se logra: a) la identificación de alternativas factibles o posibles como factores o variables involucradas directamente en la capacidad de diversificación de territorios o regiones; b) la construcción de criterios mediante una estructura jerárquica; c) la evaluación del desempeño de cada alternativa o factor con respecto a cada criterio; y d) la agregación de los resultados (*índice de diversificación de zonas cañeras*) para obtener la zonificación que ofrece las mejores evaluaciones para futuros proyectos de diversificación basados en las capacidades y recursos a escala local y regional.

El modelo determinó que la aptitud agroclimática al cultivo de caña de azúcares el factor limitante más importante para el establecimiento de proyectos de diversificación en unidades productivas cañeras, seguido por el rendimiento de campo y el acceso a la tierra o tamaño de la unidad productiva o superficie cañera ya que juntos explican el 77,9 % de la capacidad para diversificarse. La aptitud, al explicar el 38,1 %, tiene un impacto importante ya que determina la capacidad del territorio para producir materia prima, en cantidad y calidad, por ciclo productivo y expandir la frontera agrícola actual de forma gradual. Estos efectos están estrechamente vinculados con la calidad del suelo, las condiciones climáticas y la afectación por plagas bajo régimen de secano. Por lo tanto, existe un fuerte vínculo entre la aptitud y el tipo de gestión agrícola que determina el desarrollo agrícola en la región. Este instrumento de gestión al combinarlo con sistemas de información geográfica está estructurado a guiar las decisiones regionales para un proceso de toma de decisiones del uso de la superficie cañera con fines de diversificación.

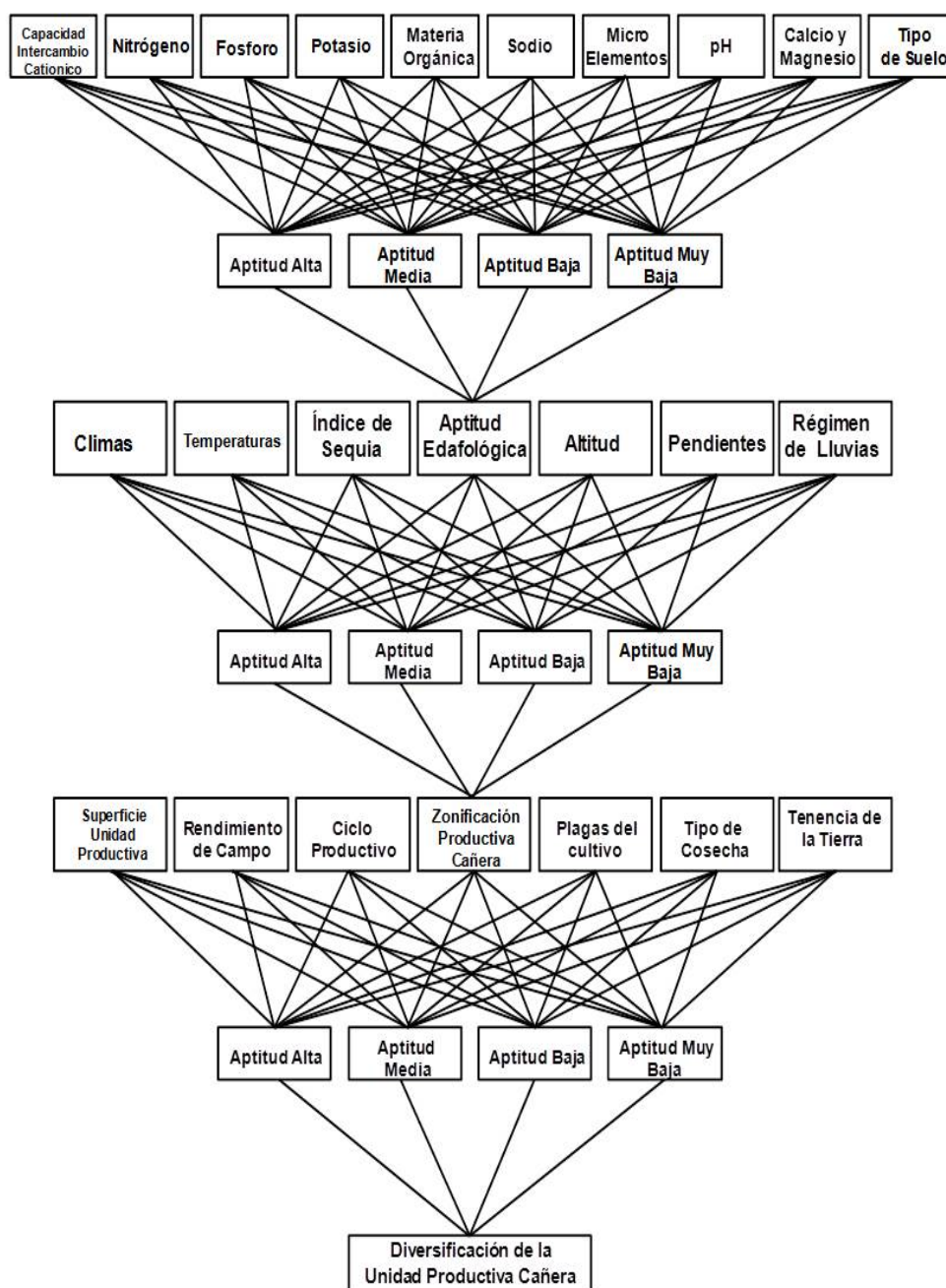


Figura 1. Estructura jerárquica de Saaty para el análisis de la capacidad o aptitud para diversificar unidades productivas cañeras bajo régimen de secano (Aguilar, 2011)

3.2. Análisis de ciclo de vida (LCA)

Diversas metodologías han sido desarrolladas en el área de gestión ambiental, como el concepto de ciclo de vida (LCA o ACV) que involucra el análisis, documentación y cuantificación de las cargas ambientales de la vida completa de un producto, de la cuna hasta la tumba, y su servicio asociado. La metodología LCA, además de permitir un seguimiento sobre cada uno de los pasos del proceso de producción de caña de azúcar y sus derivados determina cuáles son los impactos más significativos para cuantificar y les asigna un ecopuntaje (huella ecológica) por la generación de gases de efecto invernadero (GEI's). Los trabajos del panel intergubernamental sobre cambio climático IPCC, García et al. (2011) e Islas (2007) en México, Contreras et al. (2009) de Cuba,

Kumar et al (2011) de India, Sánchez (2007) de Colombia, Renoufet al. (2013, 2010, 2006), de Australia, Amores et al., (2013) y Caro (2004) de Argentina, Ramjeawon (2004) de Isla Mauricio, Mashoko et al. (2010) de Sudáfrica; Saavedra (2000) de Colombia y Lopes Silva et al., (2014); Guerra et al., (2014), Pereira, (2010), Van der Voet y Huppés (2009), Días De Oliveira (2008),Carvalho (2004) y Moreton Chohfi (2004) de Brasil ofrecen una aproximación conceptual y metodológica del análisis del balance de emisiones de la producción de azúcar crudo (estándar) de forma individual y cogeneración y Renouf et al., (2013, 2010, 2006) en forma paralela azúcar y etanol combustible para identificar los puntos críticos del sistema con fines de diversificación productiva (Figura 2).

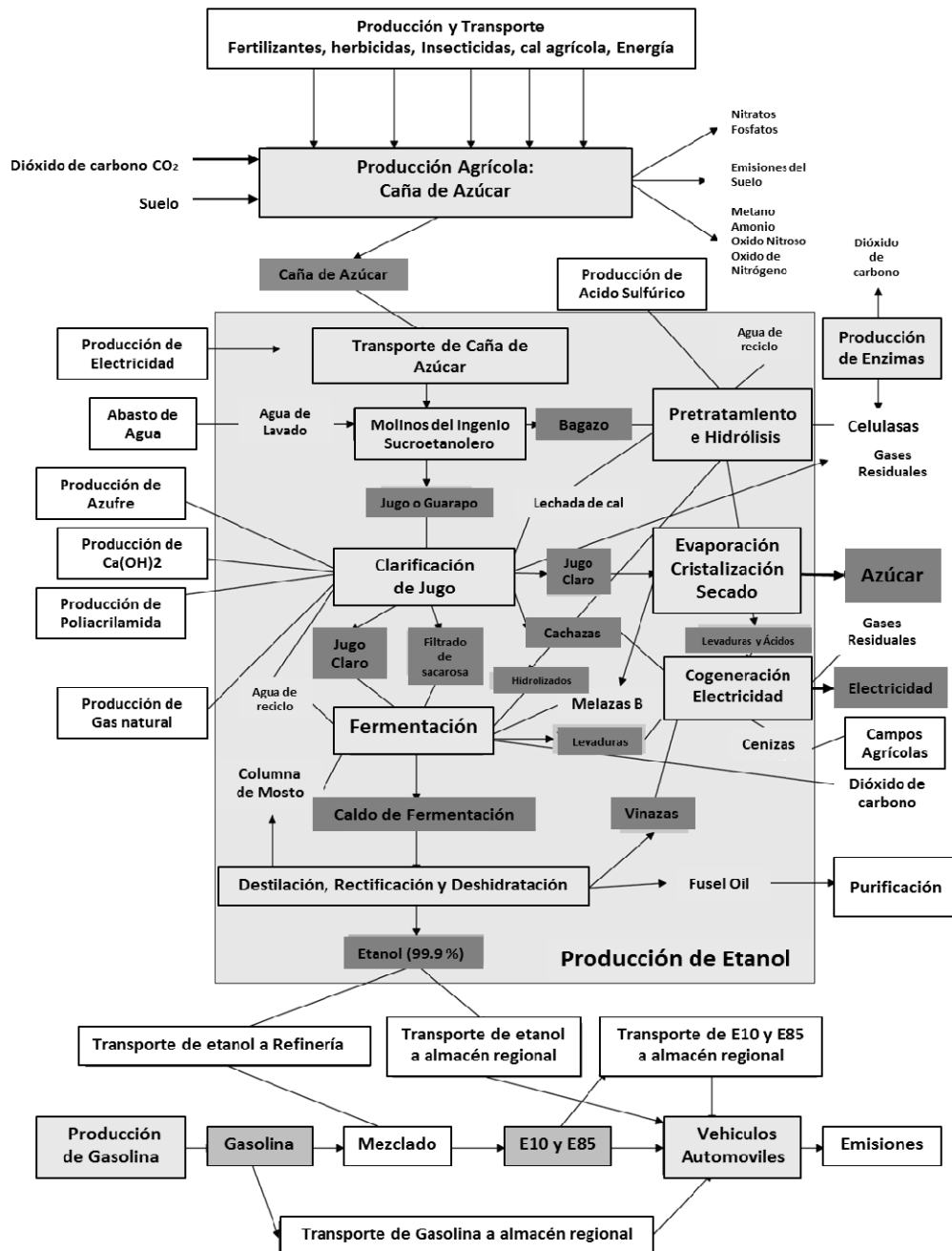


Figura 2. Marco conceptual para el análisis de ciclo de vida (LCA) de la producción diversificada (Renouf et al, 2013; 2010; 2006)

Los trabajos analizados presentan un balance global de emisiones en todas las etapas del sistema cañero (Tabla 1)

Tabla 1. Balance de emisiones del cultivo de caña (Moreton, 2004)

<i>Fase emisora, proceso, operación o actividades que emite CO₂</i>	<i>Ciclo de primer corte (kgCO₂/ha 1^o corte)</i>	<i>Ciclo de 5 cortes (kgCO₂/ha)</i>	<i>Emisión total (kgCO₂/ha/ciclo de vida)</i>
1) Preparación del campo para plantío			
1.1) Producción y manutención de equipamientos y máquinas agrícolas	75,3		75,3
1.2) Tractores y máquinas agrícolas	19,4		19,4
2) Plantío o siembras nuevas			
2.1) Transporte de las plántulas a la ubicación de plantación	46,6		46,6
2.2) Operaciones de plantío	5,2		5,2
3) Gerenciamiento del cultivo y plantación			
3.1) Aplicación (tractores y máquinas)			
Cal agrícola	0,4		0,4
Herbidas	0,4	2,0	2,4
Cachaza	27,3		27,3
Vinazas	35,3	176,3	211,6
Fertilizantes	9,2		9,2
3.2) Producción de insumos agrícolas			
Cal agrícola	16,8		16,8
Herbidas	36,1	180,5	216,6
Insectidas	2,0		2,0
3.3) Transporte de insumos agrícolas			
Cal agrícola	0,6		3,0
Herbidas	0,6	3,0	3,6
Cachaza	0,6		3,0
Vinazas	0,6	3,0	3,6
Fertilizantes	0,6		3,0
Insectidas	0,6		3,0
3.4) Emisiones del suelo			450,0
4) Cosecha			
4.1) Máquinas cosechadoras	4,6	33,5	38,1
4.2) Camiones cargadores	304,7	1.267,5	1.554,2
5) Transporte de tallos de caña			
5.1) Transporte al ingenio	67,6	338,0	405,6
Total			3,054.2

Emisión total = 108,395 kgCO₂/ha/ciclo de vida + 3,054.2 kgCO₂/ha/ciclo de vida = 111, 449,2 kgCO₂/ha/ciclo de vida.

Secuestro total = 29,110.5 kgCO₂/ha/ciclo planta + 116,180 kgCO₂/ha/5 cortes = 145,290.5 kgCO₂/ha/ciclo de vida.

Balance de masa de CO₂: 111,449.2 kgCO₂/ha/ciclo de vida + (-145,290.5 kgCO₂/ha/ciclo de vida) = -33,841.3 kgCO₂/ha/ciclo de vida de débito de CO₂.

Por lo tanto, el valor negativo establece que la producción de caña contribuye en gran medida a la captura de gases de efecto invernadero. Para Saavedra (2000) en las etapas de corte y cosecha se obtiene el 91,8% del impacto total causado por el cultivo. Así, la quema y requema, gases de combustión y la acidificación contribuyen principalmente la etapa de corte y cosecha y el manejo de residuos. La etapa de riego, por su parte, contribuye a los problemas de acidificación y sobre todo al problema de la eutrofización. Las otras etapas no tienen una contribución significativa a los problemas ambientales y en cuanto a proposición de mejoras. La razón por la que el proceso de fertilización y nutrición tiene un alto porcentaje de contribución a la eutrofización, la quema de biomasa emite a la atmósfera polvo o sustancias orgánicas que contribuyen al smog así como SO₂ que al sumarse con el agua y el vapor de agua se convierte en SO₄ que se precipita a la tierra en forma de lluvia ácida (Tabla 2).

Tabla 2. Balance energético global para la producción de etanol de caña de azúcar (Carvalho Macedo *et al.*, 2004)

<i>Nivel</i>	<i>Consumo Energético</i>			
	<i>Escenario 1 (kCal/Ton caña)</i>		<i>Escenario 2 (kCal/Ton caña)</i>	
Producción de caña (Total)	48,208		45,861	
Operaciones agrícolas	9,097		9,097	
Transportes	10,261		8,720	
Fertilizantes	15,890		15,152	
Cal, herbicidas, pesticidas etc.	4,586		4,586	
Semilla de caña	1,404		1,336	
Equipos	6,970		6,970	
Producción de etanol (Total)	11,800		9,510	
Energía eléctrica	0		0	
Químicos y lubricantes	1,520		1,520	
Obra civil	2,860		2,220	
Equipo	7,420		5,770	
Flujos externos	Input	Output	Input	Output
Agricultura	48,208		45,861	
Fabrica	11,800		9,510	
Etanol Producido		459,100		490,100
Bagazo excedente		40,300		75,600
Total	60,008	499,400	55,371	565,700

Relación Energía renovable/Energía Fósil	8,3	10,2
---	-----	------

En este sentido Renouf et al., (2013, 2010 y 2006) han demostrado que la diversificación de la agroindustria azucarera y sus escenarios evaluados mediante el análisis de ciclo de vida (LCA), como una representación holística de los impactos de la producción, podrían lograrse beneficios ambientales como la conservación de los recursos energéticos no renovables y reducir el potencial calentamiento global, es decir, la metodología LCA determinó que la diversificación basada en la utilización de los coproductos en la agricultura cañera y otros usos industriales presenta beneficios similares a los que podrían ser adquiridos a través de la adopción de prácticas eco-eficientes del cultivo de caña para maximizar el crecimiento de beneficios. Las opciones de bio-producción de derivados de la caña específicas como el etanol y la cogeneración que requieren de expansión de la producción de caña de azúcar también ofrecen mayores beneficios ambientales, pero hay ventajas y desventajas de una mayor productividad agrícola cañera, que no puede ser compensada por la producción de combustibles fósiles desplazados y el uso del suelo y del agua. Los beneficios de estos escenarios deben ser reevaluados continuamente a través del LCA para determinar si los efectos directos e indirectos de los impactos del cambio del uso del suelo son ambientalmente compatibles para justificar los efectos de ampliación producción agrícola cañera y deben ser considerados en el ámbito local y la escala regional. Por lo tanto, mediante el examen de los factores que influyen en LCA, los autores concluyeron que se ha demostrado que los resultados están influidas por (1) la naturaleza del sistema de procesamiento de caña de azúcar (es decir, el rango de productos producidos a partir de la caña y el sistema de producción), (2) la variabilidad en la calidad y cantidad de la materia prima, (3) el enfoque adoptado para la asignación de los impactos de los múltiples productos del procesamiento de la caña de azúcar específicos (azúcar, etanol, composta, electricidad etc.) y el uso final de los subproductos generados para cada región productora de caña y los ingenios azucareros o destilerías.

3.3. *Emergy*

En las evaluaciones convencionales de los sistemas productivos de diversificación de la agroindustria azucarera (campo y fábrica), los resultados están muy relacionados con las respuestas de factibilidad técnica y financiera de los proyectos de diversificación. Sin embargo, se tiene en consideración que en un sistema productivo cañero convencional y diversificado, los actores sociales y la contribución de la naturaleza (sol, lluvia, viento, suelo etc.), son parte decisiva en los sistemas y por ende en sus resultados, es por esto que surge la necesidad de contabilizar en las evaluaciones de los proyectos de diversificación la energía proveniente de los recursos de la economía y de la naturaleza para producir bienes y servicios. En este sentido, el Análisis Emergético, como metodologías de la economía ecológica en el análisis de sustentabilidad y con criterios agroecológicos y socioeconómicos, constituye una herramienta valiosa para la evaluación integral y sistémica de la energía y su conversión en la cadena agroindustrial de la caña de azúcar y su diversificación, en la cual se estiman valores de las energías

naturales incorporadas a los productos, procesos y servicios. La definición de emergía presentada por Odum (1996) establece que la “Emergía” o “Memoria emergética” es la energía disponible que fue previamente utilizada directa e indirectamente para generar un servicio o producto. El análisis emergético, es la metodología de base científica que contabiliza el valor ambiental y el valor económico, haciendo uso de la Economía, Teoría de Sistemas, Termodinámica, Biología y los nuevos principios del funcionamiento de sistemas abiertos. Este abordaje posibilita visualizar y cuantificar de forma dinámica los flujos de los recursos naturales, de los servicios ambientales provenientes de la naturaleza y de los impactos de las actividades antrópicas, permitiendo la comprensión de los límites en cada ecosistema o sistema productivo y el establecimiento de metas para garantizar la capacidad de soporte, es decir, determina la sustentabilidad de los sistemas.

Con el objetivo de analizar las diferentes contribuciones de flujos energéticos (naturaleza y economía) bajo una unidad común, el análisis emergético o *emergy* utiliza la energía equivalente de radiación solar. La unidad de emergía es el emjoule *solar* (abreviado queda seJ). La Intensidad Emergética equivale al valor real del producto, o sea, toda la emergía utilizada en la producción de una determinada cantidad del producto. Existen tres principales tipos de Intensidad Emergética: Transformidad (en seJ.J-1), Emergía Específica (en seJ.g-1) e Emergía por Unidad Monetaria (en seJ.\$⁻¹). La transformidad de un producto mide la calidad de energía y su posición jerárquica en la energía universal, la cual se obtiene a partir de la suma de todas las entradas de emergía solar del proceso (en seJ) y se divide por la energía proveniente del producto final (en J). Cuanto mayor el número de transformaciones de energía necesarias para la elaboración de un producto o la ejecución de un proceso, mayor será el valor de su transformidad, siendo mayor también la importancia del recurso para los ecosistemas y para los seres humanos. El análisis emergético consiste en los siguientes pasos:

- a) Elaboración del Diagrama Sistémico.
- b) Elaboración de la Tabla de Evaluación Emergética.
- c) Cálculo de los Índices Emergéticos.
- d) Interpretación de los resultados (Ortega, 2005).

Para los derivados de la caña de azúcar, los estudios de análisis emergéticos se han enfocado en su mayoría a la producción de etanol Bastianoni (1996); Lanzotti (1999, 2000); Ometto et al. (2004); Alonso-Pippo et al. (2004); Pereira (2006); Agostinho et al., (2010); Amponsah (2012) con el sistema agrícola convencional y a partir del análisis de forma cualitativa de la totalidad de fuentes de energía que entran, las que salen y los flujos internos en el sistema agroindustrial.

Para el sistema de producción de etanol a partir de caña de azúcar, el principal contribuyente emergético es la etapa agrícola, lo que representa el 83% de todos los flujos de emergía utilizados. En segundo lugar la etapa industrial 15% y el transporte de caña de azúcar 2%. Cuando se considera la cadena completa, los recursos de la economía y materiales (36,7%) y servicios (26,9%) fueron los principales flujos energéticos del sistema. Sin embargo, de forma individual la principal contribución fue de lluvia (28 %). fertilizantes y pesticidas (20%), mientras que los combustibles fósiles

(6%), trabajo, ya sea contratado o temporal, contribuyó con 10% de los flujos energéticos en SEJ (julios equivalentes solares, o energía solar).

El uso del análisis de emergencia indica que el sistema de producción de etanol, aunque es extremadamente eficiente en energía (conversión de energía solar en biocombustible de la caña de azúcar) el sistema no es renovable, por lo tanto, no puede ser sostenido en el largo plazo. Y por lo tanto el subsistema agrícola cañero presenta bajos índices porque el uso de etanol se asocia con el consumo significativo de recursos naturales como el agua, la pérdida de suelo y el área de cultivo necesario para la producción de caña de azúcar. Este resultado es debido a la utilización de grandes cantidades de insumos, combustibles en especial diésel para las operaciones agrícolas. Por lo tanto, el diseño y la adopción de prácticas más sostenibles, como la agricultura ecológica y cultivos de rotación e intercalados (diversificación agrícola), durante la etapa agrícola cañera tendrían como resultado una mejora del comportamiento ambiental y energético de la producción de etanol de caña de azúcar. Estos recursos y los flujos de masa, energía y combustible no son generalmente representados en los análisis económicos clásicos (economía ambiental). Sin embargo, ellos tienen un gran impacto ambiental a nivel local y regional así como la producción de etanol y las emisiones de CO₂ del cultivo de caña de azúcar, debido al uso de combustibles y otros insumos industriales derivados de recursos no renovables (principalmente fertilizantes, agroquímicos y cal agrícola) y los combustibles por el transporte (Pereira, 2010) (Figura3).

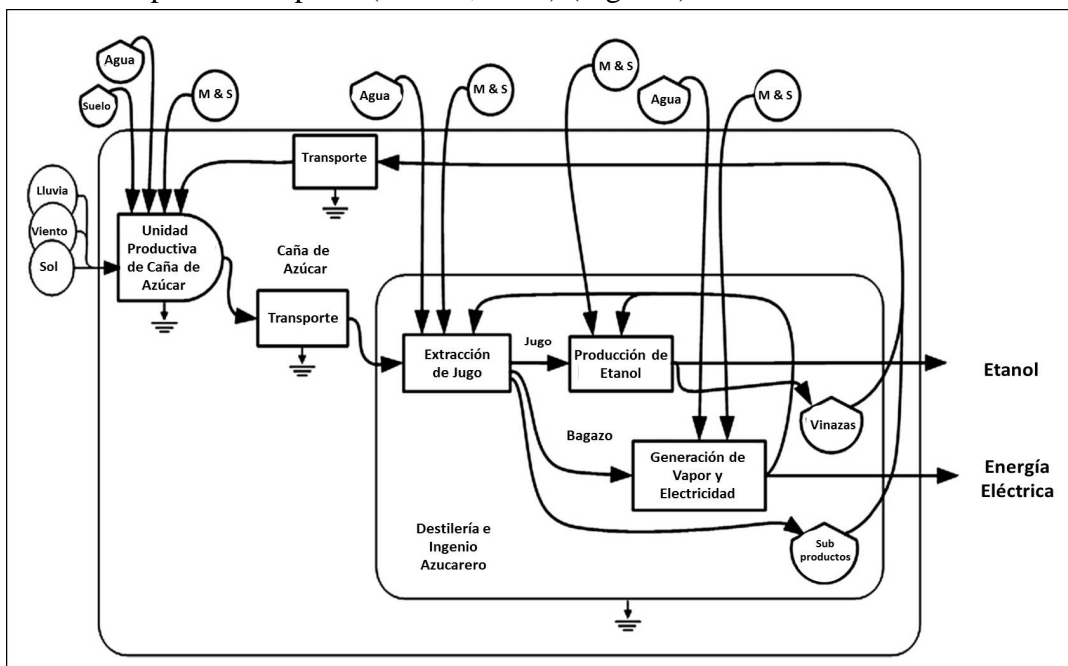


Figura 3. Diagrama Emergético del sistema de producción agrícola e industrial de etanol de caña de azúcar (Pereira, 2010)

4. CONCLUSIONES

Los métodos de la economía ecológica discutidos en este trabajo, determinan que la clasificación jerárquica en zonas de muy alta a muy baja aptitud hacia la diversificación de unidades productivas cañeras (EMC) y el balance energético (eMergy) y ambiental del cultivo (LCA) establecen, según Chaplin(2000), que además de los factores que

caracterizan a las zonas por capacidad para diversificarse, existe un conjunto más amplio de razones que podrían explicar diversos niveles de especialización y diversificación. En primer lugar, los recursos disponibles (tipo de suelo clima, disponibilidad de agua, insumos agropecuarios, combustibles, agroquímicos conocimiento etc.) y los impactos ambientales afectan a las oportunidades para el cultivo base y otras producciones (cultivos, ganadería de doble propósito, aves de corral, servicios ambientales, microempresas, pesca, turismo, agroforestería, etc.). Además, los agricultores cañeros a nivel mundial tienen diferentes niveles de conocimientos y experiencias sobre las actividades específicas de producción, diversificación de unidades productivas y sus impactos ambientales, y los planes de explotación fuera de esta base de conocimientos podrían ser más riesgosos. Esto implica que las zonas con antecedentes de monocultivo cañero (único cultivo que interesa comercialmente principalmente en la producción de azúcar) tienden a permanecer especializados. En segundo lugar, el grado de diversificación en los mercados regionales o nacionales y aun mundiales influirá en la producción final del predio. Un mercado poco diversificado tiende al monocultivo. En tercer lugar, las restricciones de acceso al mercado tienden a reducir la gama de mercancías producidas y el monocultivo. En cuarto lugar, la infraestructura y el acceso a recursos energéticos que prevalecen en las zonas rurales afecta la disponibilidad de insumos y acceso a los mercados. Por lo tanto, la infraestructura deficiente puede limitar la diversificación y aumentar la tendencia al monocultivo. En quinto lugar, pero no por ello menos importante, están los factores históricos y políticos como la colonización y la legislación gubernamental, que creó las plantaciones y dejó una infraestructura y recursos sesgada hacia el monocultivo y un aumento de la propensión a la especialización y finalmente la simbiosis de estos métodos de la economía ecológica discutidos en este trabajo, permitió identificar cuáles son los impactos ambientales más importantes y cuáles son los problemas ambientales que deben ser tratados con mayor urgencia para cada tipo de sistema de manejo tradicional, especializado o diversificado. Por otro lado, las metodologías hacen posible una comparación satisfactoria en materia ambiental energética y espacial entre los procesos de producción de caña de azúcar y la diversificación. Esto gracias a la cuantificación y al puntaje que da a cada una de las etapas del proceso, y a que permite dar una calificación a todo el ciclo de vida de los cultivos y el balance energético por nivel de aptitud hacia la diversificación y le da el componente espacial a escala local. Por lo tanto, un alto índice de productividad en campo en cantidad y calidad (caña molida, rendimiento agroindustrial, de campo, fibra y sacarosa) y la capacidad del campo para cubrir la demanda de caña de azúcar al mercado (ingenios) son los factores que *a priori* permiten identificar las oportunidades de producir mayor caña de azúcar para otros proyectos de diversificación, mediante la adopción de tecnologías y metodologías de gestión ambiental como eMergy, LCA y EMC entre otras para incrementar los rendimientos, la incorporación paulatina de más superficie al cultivo y monitorizar los impactos ambientales.

REFERENCIAS

- Agostinho, F., Ambrosio, L.A., Ortega, E., (2010). Assessment of a large watershed in Brazil using emergy evaluation and geographical information system. *Ecological Modelling*, 221: pp.1209-1220.
- Alonso-Pippo, W; Rocha, J.D.; Mesa-Pérez, J.M., Olivares-Gómez E., Cortez L.A.B. (2004). Emergy evaluation of bio-oil production using sugarcane biomass residues at fast pyrolysis pilot plant in Brazil. En Ortega, E. & Ulgiati, S. (editors): *Proceedings of IV Biennial International Workshop "Advances in Energy Studies"*. Unicamp, Campinas, SP, Brazil. June 16-19, 2004. pp. 401-408
- Aguilar R. N., G. G. Mendoza, C. Contreras S., J. Fortanelli M. (2012). A methodological approach to sugar mill diversification and conversion. *Ingeniería e Investigación*. 32 (2): pp. 23-27.
- Aguilar R. N. (2012). Paradigma de la diversificación de la agroindustria azucarera de México. *Convergencia Revista de ciencias sociales*. 19 (59): pp. 187-213
- Aguilar R.N. (2011). Competitividad de la agroindustria azucarera de la Huasteca México. Tesis de Doctor en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 476 p.
- Amores, M. J., Mele, F. D., Jiménez, L., Castells, F. 2013. Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (7), pp. 1344-1357.
- Amponsah N.Y. (2012). Sustainable Biofuel Project: Emergy Analysis of South Florida Energy crops. <http://www.imok.ufl.edu/docs/pdf/soils/biofuels/EmergyAnalysisofSouthFloridaEnergyCrops.pdf>
- Basanta R., García D. M.A, Cervantes M. J.E., Mata V.H., Bustos V.G. (2007). Sostenibilidad de reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 5 (4): pp. 293-305.
- Bastianoni, S., Marchetinni, N. (1996) Ethanol production from biomass: Analysis of process efficiency and sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 11 (5): pp. 411-418.
- Birch R. G. (2007). Metabolic engineering in sugarcane: assisting the transition to a bio-based economy. Chapter 11. Botany Department, School of Integrative Biology, The University of Queensland, Brisbane 4072 Australia R. Verpoorte c Springer et al. (eds.), *Applications of Plant Metabolic Engineering*, pp.249-281
- Brambila-Paz J. J.2013. La bioeconomía, las biorefinerías y las opciones reales: el caso del bioetanol y el azúcar. *Agrociencia* 47: pp. 281-292.
- Campillo A., Fernández Gago R. (2009). ¿Qué factores determinan la decisión de diversificar? *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa* 15 (1): pp. 15-28.
- Caro, R. F. (2004).Balances Energéticos de Caña de Azúcar como Cultivo Energético en Tucumán, Argentina En: <http://www.aba-agroecologia.org.br/ojs2/index.php?journal=rbagroecologia&page=article&op=viewFile&path%5B%5D=9352&path%5B%5D=6490>
- Carvalho Macedo I., M. Regis Lima, J. E. Azevedo R. (2004). Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil Copersucar Piracicaba Brasil 47 p.
- Cespón R., J. A. Knudsen, F. Marrero (2008). Gestión logística de residuos en la industria azucarera cubana". *Revista VIRTUALPRO*® 82: pp. 1-15.
- Contreras A.M, Elena Rosa, Maylier Pérez, Langenhove HV, Dewulf J. (2009) Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production*; 17: pp. 772-779.

- Chaplin H. (2000). Agricultural diversification: a review of methodological approaches and empirical evidence. Department of Agricultural Economics and Business Management, Wye College, University of London. Working paper 2:70.
- Dias De Oliveira M.D. (2008). Sugarcane and Ethanol Production and Carbon Dioxide Balances. *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*, Springer Science Business Media B.V.
- Franco, M. M. 2008. Use of Geographical Information Systems to evaluate the potential of cogeneration from sugarcane residues in the state of São Paulo, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 120 p. Dissertation (M.Sc.)
- Garcia C. A., A. Fuentes, A. Hennecke, E. Riegelhaupt, F. Manzini and O. Masera (2011) Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Appl Energy Applied Energy* 88 (6): pp. 2088-2097
- Guerra, J. P. M., Coleta Jr, J. R., Arruda, L. C. M., Silva, G. A., Kulay, L. 2014. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-12. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11367-014-0702-9#page-1>
- Higgins A., P. Thorburn, A. Archer , E. Jakku (2007). Opportunities for value chain research in sugar industries. *Agricultural Systems* 94: pp. 611–621
- Islas J., F. Manziniand O. Masera (2007). A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy* 32 (12): pp. 2306-2320
- Kumar M. C., S. Varun, C., S. Kumar S.(2011). Life cycle assessment of sugar industry: A review. *RenewableandSustainable Energy Reviews* 15: pp. 3445– 3453
- Lanzotti C.R. (2000). Uma análise emergética de tendências do setor Sucroalcooleiro. Dissertação de mestrado acadêmico Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.faculdade de engenharia mecânica universida de estadual de campinas, 106 p.
- Lanzotti, C. R., Ortega, E. , Guerra, S.M G. (1999). Energy Analysis And Trends For Ethanol Production In Brazil. Proceedings from the First Biennial Energy Analysis Research Conference, Gainesville, Florida.
- Lopes Silva, D. A., Delai, I., Delgado Montes, M. L., Roberto Ometto, A. 2014. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp. 532-547.
- Mashoko, L. M. Charles, T. Valerie M. (2010) LCA of the South African sugar industry, *Journal of Environmental Planning and Management*, 53 (6): pp. 793-807
- Mirkov TE, Damaj MB, Gonzalez J, Molina J, White SG, Nikolov Z. (2006). Sugarcane as a biofactory for the economic production of low to medium value proteins: reality or wishful thinking? In ‘Tropical Crop Biotechnology Conference’. Cairns. (Ed. JM Manners) (CSIRO).21 p.
- Moreton Chohfi (2004). balanço, análise de emissão e seqüestro de co2 na geração de ELETRICIDADE excedente no setor sucro-alcooleiro, Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia da Energia da Universidade Federal de ItajubáUniversidad Federal de Itajubá 96 p.
- Odum, H.T. (1996). Environmental Accounting, EMERGY and Decision Making. JohnWiley, New York, 370 p.
- Ometto, A.R., Roma, W., Ortega, E., (2004). Emery life cycle assessment of fuel ethanol in Brazil: in Ortega, E. Ulgiati, S. (editors): *Proceedings of IV Biennial International workshop “Advances in Energy Studies,”* Unicamp, Campinas, SP. Brazil.

- Ortega, E. Cavalett, O. Bonifácio, R. Watanabe, M. (2005) Brazilian soybean production: energy analysis with an expanded scope. *Bulletin of Science, Technology e Society*. SAGE Publications. Toronto. 25 (4): pp. 323-334
- Pereira C. L.F., E. Ortega. (2010). Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane. *Journal of Cleaner Production* 18: pp. 77–82
- Pereira, J.T., Dalbem, J.A., (2006). Evaluation of sugarcane production in Brazil based on data from producers with good management systems and comparison with published results, 5th Biennial International Workshop, Advances in Energy Studies.
- Ramjeawon T. (2004). Life Cycle Assessment of Cane-Sugar on the Island of Mauritius. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 9(4): pp. 254-260.
- Renouf, M. A., Allsopp, P. G., Price, N., Schroeder, B. L. 2013. Cane LCA—a life cycle assessment (LCA) based eco-efficiency calculator for Australian sugarcane growing. In *Proceedings of the Australian Society of Sugarcane Technologists* (Vol. 35) <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:315417>
- Renouf M. A., R. J. Pagan, M. K. Wegener. (2013). Bio-production from Australian sugarcane: an environmental investigation of product diversification in an agro-industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 39: pp. 87-96
- Renouf M. A., R. J. Pagan, M. K. Wegener. (2010). Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15 (9): pp. 927-937
- Renouf M. (2006). LCA of Queensland cane sugar lessons for the application of LCA to cropping systems in Australia 5th Australian Conference on Life Cycle Assessment Achieving business benefits from managing life cycle impacts Melbourne, 22-24 November.
- Saaty, T.L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research, Amsterdam*, 48: pp. 9-26.
- Sánchez J. O. (2007). Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol. En: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/215/21514606.pdf>
- Saavedra; J. F. (2000). Comparación del impacto ambiental del ciclo de vida del cultivo de caña de azúcar tradicional y orgánico utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Santafé de Bogotá. 131 p.
- Tenerelli P, Monteleone M. A (2008). combined land-crop multicriteria evaluation for agro-energy planning. Italy: SUSTOIL, University of Foggia; <http://sites.google.com/site/sustoilfg/VP5.2.12.pdf>
- Van der Voet E., G. Huppes(2009). Chapter 3 Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Bioethanol from Sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 13 (6-7): pp. 1613-1619.
- Waclawovsky A. J., P. M. Sato, C. G. Lembke, P. H. Moore, G. M. Souza. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnology Journal* 8: pp. 263–276.