

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Estimación cuantitativa de la huella del carbono en el cultivo de la caña de azúcar en Villa Clara

Quantitative estimation of the carbon footprint in the sugar cane culture in Villa Clara

Elier Gavilán Martínez y Mario Reinoso Pérez

Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuani km 5½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba, CP 54830

E-mail: eliergm@uclv.cu

RESUMEN

Se determinó la huella del carbono del sector cañero en Villa Clara, utilizando como casos de estudios dos Cooperativas de Producción Agropecuaria dedicadas al cultivo de la caña de azúcar. Para ello se cuantificaron los aspectos ambientales asociados a dicho cultivo, desde la preparación del suelo hasta la cosecha y entrega a la industria. Los datos primarios correspondientes a cada aspecto ambiental fueron recolectados y sometidos a triangulación, mediante técnicas y herramientas de la Investigación-Acción-Participación. Las emisiones de CO₂-eq por hectárea muestran diferencias altamente significativas entre ambos casos de estudio, correspondiendo los valores más altos a la CPA "Jesús Menéndez". El consumo de portadores energéticos, de materiales no orgánicos y de gases industriales, así como el uso del suelo son los aspectos ambientales con mayor peso en la magnitud de la huella del carbono en ambos casos de estudios, con valores porcentuales superiores al 11 % respecto al total de emisiones de CO₂-eq. La emisión media anuales de CO₂-eq en relación a la producción física es significativamente superior en la CPA "Jesús Menéndez", de lo que se infiere que la obtención de una tonelada de caña de azúcar en esta unidad productiva implica un mayor costo económico y ambiental en comparación con la CPA "4 de abril". Se concluye que los sistemas de producción de las unidades productivas objeto de estudio tienen un comportamiento similar en cuanto a su contribución al calentamiento global.

Palabras clave: aspectos ambientales, dióxido de carbono, huella del carbono, sector cañero

ABSTRACT

The carbon footprint in the sugar cane sector in Villa Clara province was determined by using as cases study two Agricultural Production Cooperatives (CPA) dedicated to sugar cane cropping. For this purpose, the environmental aspects associated with the sugar cane cultivation, from the land preparation for the industry delivery, were quantified. Data matching to each environmental aspect were collected and subjected to triangulation using Participatory-Action Research techniques and tools. CO₂-eq emissions per hectare show significant differences between the study cases, matching the higher value to the "Jesús Menéndez" CPA. The

consumption of energy sources, non-organic materials and the industrial gasses, as well as the use of soil, are the environmental aspects with the higher burden on the carbon footprint in both study cases, with percentage values upper than 11 % out of total CO₂-eq emissions. The CO₂-eq average annual emissions in relation to the physical production are significantly higher at the “Jesús Menéndez” CPA, that’s why the crop of one tonne of sugar cane in the CPA implies a higher economic cost compared with the “4 de abril” CPA. It is concluded that the productive systems of both cases studies have a similar performance regarding their contribution to the global warming.

Keywords: environmental aspects, carbon dioxide, carbon footprint, sugar cane sector

INTRODUCCIÓN

Es reconocido que la agricultura tiene un impacto muy significativo sobre todos los componentes del medioambiente, incluidos el aire, la atmósfera, el suelo, el agua, la biodiversidad y el paisaje, y es uno de los sectores con repercusiones más graves en los principales problemas ambientales a todos los niveles, desde el ámbito local hasta el mundial (Steinfeld *et al.*, 2006).

Cuba y particularmente su sector cañero no constituye una excepción, pues el cultivo de la caña de azúcar se ha basado en el empleo del monocultivo y de elevados niveles de insumos externos, fundamentalmente combustibles fósiles, maquinaria agrícola pesada y agroquímicos. Esta situación ha contribuido a incrementar los impactos negativos de este sector sobre el medioambiente, entre los que se destacan la pérdida de biodiversidad, el deterioro de la fertilidad de los suelos, la erosión, la salinización y la contaminación atmosférica, entre otros. Por consiguiente, se hace necesario desarrollar herramientas acordes con el grado de complejidad que caracteriza las interacciones entre los sistemas ecológico y socioeconómico de las diferentes fincas u unidades productoras. Dichos indicadores económicos, sociales y ambientales tradicionales se han manifestado ineficaces, por lo que se hace necesario desarrollar otros nuevos indicadores, capaces de lograr la integración deseada, propiciando una determinación mucho más acertada en medida para cada estudio realizado.

En este contexto, la huella ecológica ha sido reportada según sus propios autores (Wackernagel y Rees, 1998) como la “superficie de tierra productiva o ecosistema acuático necesario para mantener el consumo de recursos y energía, así

como para absorber los residuos producidos por una determinada población humana o economía, independientemente de la localización de esa superficie”, por lo cual representa un indicador integrador de sostenibilidad que permite evaluar el impacto ambiental de un determinado territorio o actividad económica sobre los recursos naturales. Es, sin dudas, una herramienta útil para estimar en qué magnitud el consumo humano excede la capacidad de regeneración de la biosfera y se fundamenta en dos hechos irrefutables: (i) para producir cualquier bien o servicio, independientemente del tipo de tecnología utilizada, se necesita un flujo de materiales y energía provenientes, en última instancia, de sistemas ecológicos o de la energía solar y (ii) tanto el consumo de recursos como la generación de residuos, pueden ser expresados como la superficie productiva necesaria para mantener determinados niveles de consumo (Doménech, 2010). Por consiguiente, la estimación de la huella ecológica, especialmente la huella del carbono a nivel corporativo, no sólo es beneficioso para el medioambiente sino que también favorece el aumento de la rentabilidad económica, a través de la optimización del consumo de los insumos productivos (Espíndola y Valderrama, 2012).

De lo antes expuesto se infiere que a medida que la huella ecológica se incrementa, el impacto sobre el medioambiente y particularmente sobre los recursos naturales se hace más significativo, mientras que la eficiencia económica de la entidad se deteriora. En consecuencia, con este fundamento se asume que los aspectos ambientales definidos por la NC-ISO 14001:2015 como aquellos elementos de las actividades, productos o servicios que interactúan con el medioambiente, determinan la magnitud de la huella ecológica de cualquier actividad

antropógena (Reinoso *et al.*, 2015).

Por otra parte, en Cuba y particularmente en el sector cañero de Villa Clara, existe carencia de una metodología científicamente validada que pueda ser aplicable a las diferentes formas productivas, para evaluar este indicador de sostenibilidad con un enfoque integrador y holístico. En este contexto, resulta conveniente la elaboración y aplicación de una herramienta que muestre, de modo simple, la situación ambiental de los sistemas productivos a la vez que constituya un elemento útil para la toma de decisiones.

Teniendo en cuenta esas realidades con el presente trabajo se establece el marco teórico-referencial que permita la contextualización de las bases metodológicas y procedimentales para la estimación de la huella ecológica empresarial, con las condiciones peculiares de la economía cubana, así como evaluar la sostenibilidad económica, ambiental y social del sector cañero de Villa Clara, utilizando como casos de estudios dos Cooperativas de Producción Agropecuaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de los casos de estudio utilizados

Se utilizaron como casos de estudio dos Cooperativas de Producción Agropecuaria (CPA), la “Jesús Menéndez” con 465,92 ha bajo riego tradicional por aniego y la “4 de abril” con 264,65 ha en secano, ambas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), en el municipio de Encrucijada y pertenecientes a la Empresa Azucarera de Villa Clara.

Recopilación y verificación de la información

Los datos primarios correspondientes a cada aspecto ambiental, para los años 2012, 2013 y 2014, fueron recolectados y sometidos a triangulación, mediante técnicas y herramientas basadas en los fundamentos metodológicos de la Investigación-Acción-Participación, tales como: (i) listas de chequeo, (ii) entrevistas semiestructuradas y abiertas, (iii) observación directa participante, (iv) comprobaciones “in situ”, (v) análisis de documentos y registros propios de cada caso de estudio, así como la utilización del software “Sistema Económico Integrado” VERSAT-Sarasola.

Estimación de la huella del carbono (HC)

Se utilizó una metodología propia, elaborada

a partir los postulados del método compuesto de las cuentas contables (MCCC) desarrollado por Doménech (2010). La estimación, tanto de la huella total como de la subhuella correspondiente a cada aspecto ambiental, se realizó utilizando el siguiente modelo matemático (ecuación):

$$Y = \sum tAA * feq * fem \quad (1)$$

donde:

- Y = Huella del carbono (t CO₂-eq), resultante de la suma de todas las subhuellas.
- AA = Aspecto ambiental asociado a cada subhuella (n = 10).
- t = toneladas consumidas o generadas para el n-ésimo aspecto ambiental.
- feq = Factor de equivalencia (Gj t) utilizado para el n-ésimo aspecto ambiental
- fem = Factor de emisión (t CO₂ Gj) utilizado para la estimación de la subhuellas correspondiente a cada aspecto ambiental

Las medias anuales de las subhuellas asociadas a los aspectos ambientales cuantificados y por unidad de superficie fueron comparadas, dentro y entre ambos casos de estudio, respectivamente, aplicándose pruebas t-Student para muestras independientes mediante el programa estadístico STATGRAPHICS® Centurion XV para Windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 contiene los valores totales de la HC (t CO₂-eq), así como por unidad de superficie (t CO₂-eq ha⁻¹) estimada para cada caso de estudio. Nótese que para los tres años analizados, las emisiones absolutas totales de CO₂-eq, fueron superiores en la CPA “Jesús Menéndez”, lo cual estuvo determinado por la utilización de una mayor superficie agrícola, con el consiguiente incremento del uso de insumos productivos y por el uso agua para el riego en las plantaciones de caña de azúcar. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre las emisiones de CO₂-eq hectáreas.

El cultivo de la caña de azúcar en Cuba se ha caracterizado por la implantación de sistemas convencionales basados en el empleo del monocultivo, de variedades comerciales de elevado rendimiento potencial, de agroquímicos tóxicos y de maquinaria pesada (Paneque *et al.*, 2002) lo que ha traído como consecuencia una demanda mayor de insumos productivos

Tabla 1. Huella del carbono total, por hectárea y años para cada caso de estudio

Casos de estudio	Observaciones						Media anual ± DE	
	2012		2013		2014		A	B
	A	B	A	B	A	B		
I (CPA "Jesús Menéndez", 465,92 ha con riego)	2372,064	5,091	2648,069	5,684	2529,581	5,429	2516,571 ±138,462	5,401 ±0,265
II (CPA "4 de Abril", 264,65 ha en secano)	1437,559	5,433	1308,976	4,946	1428,747	5,399	1391,761 ±71,829	5,252± 0,297
							Valor-P	0,553

Leyenda: A - t CO₂-eq ; B - t CO₂-eq ha⁻¹

provenientes, en última instancia, de la naturaleza con el consiguiente incremento de las emisiones de gases con efecto invernadero.

Existen diversos reportes científicos sobre las alternativas tecnológicas disponibles para reducir dichas emisiones y con ello la huella del carbono. Así, Rojas y Concha (2011) sugieren el empleo de la labranza mínima para reducir las emisiones de CO₂ entre 50 y 75 % en comparación con la labranza convencional, lo cual está asociado a una disminución del consumo de combustibles fósiles.

El empleo de la paja de la caña como cobertura muerta o mulching puede ser utilizado para conservar la humedad del suelo, prevenir la erosión y reducir el uso de herbicidas, lo que permite disminuir las labores culturales en un 33 %.

Matos e Iglesias (2012) propusieron el empleo de un modelo económico-matemático para optimizar los procesos de cosecha y transportación de la caña de azúcar basada en la aplicación de la teoría de "colas o de servicio masivo". Dichos autores sostienen que por este método se puede determinar la estructura óptima, la composición y el número mínimo indispensable de cosechadoras, tractores movedores en el campo y equipos para el transporte, con lo cual también se reduciría el gasto de combustible y con ello las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Rico *et al.* (2013) evaluaron el impacto de la alternativa concerniente al tiro directo de la caña de azúcar al basculador del central, lo cual redujo el consumo de combustible fósil por concepto

de transportación en 13 L, lo que equivale a 0,036 t CO₂-eq ha⁻¹ que se dejaron de emitir a la atmósfera por este concepto. Obviamente, estas alternativas contribuyen a reducir los costos de producción tal como lo sostienen Crespo *et al.* (2014).

La Tabla 2 muestra la distribución porcentual de las subhuellas asociadas a los aspectos ambientales inherentes a la siembra, atención cultural, cosecha y transportación de la caña de azúcar.

Para el caso de estudio I, el consumo de materiales no orgánicos, de portadores energéticos, el uso del suelo, el consumo de agua y de gases industriales son los aspectos ambientales, en ese orden, que más contribuyen a la magnitud de la huella del carbono total, representando el 93 % de esta. Mientras que para el caso de estudio II el consumo de gases industriales, de materiales no orgánicos, el uso del suelo, el consumo de portadores energéticos, de bienes intangibles o servicios externos recibidos y la generación de desechos peligrosos, en ese orden, constituyen los aspectos ambientales que en su conjunto hacen una contribución del 99 % a la huella del carbono total.

Dichas emisiones son superiores a las reportadas por Doménech (2010a) y Guevara *et al.* (2010) para otras actividades productivas, lo cual se debe a que en el presente estudio de caso sólo se cuantificaron los aspectos ambientales relacionados con la roturación, las atenciones culturales, la cosecha y la transportación de la caña de azúcar, proceso productivo

Tabla 2. Distribución porcentual de las subhuellas asociadas a cada aspecto ambiental, para ambos casos de estudios

Aspectos ambientales	Casos de estudio		Valor P
	(Valores medios anuales, %±DE)		
	I (CPA "Jesús Menéndez", 465,92 ha con riego)	II (CPA "4 de Abril", 264,65 ha en secano)	
Consumo de portadores energéticos	20,19±1,410	11,58±1,186	0,001
Consumo de materiales no orgánicos	27,09±1,135	21,50±2,372	0,021
Consumo de bienes intangibles	0,15±0,021	12,26±2,697	0,016
Consumo de recursos agropecuarios	0,70±0,161	1,21±0,339	0,075
Consumo de recursos forestales	0,03±0,006	0,04±0,006	0,024
Uso del suelo	18,55±1,031	19,05±1,015	0,582
Consumo de agua	14,34±0,795	0,31±0,265	0,000
Consumo de gases industriales	12,42±1,178	25,53±2,457	0,001
Generación de desechos peligrosos	6,41±0,898	8,62±1,387	0,081
Generación de desechos sólidos	0,14±0,006	0,24±0,092	0,371

significativamente diferente a las actividades económicas evaluadas por dichos autores. Por su parte, Carballo *et al.* (2009) sostienen que las mayores emisiones atmosféricas asociadas al proceso de producción de diversos cultivos agrícolas, en el orden del 67 %, están determinadas por el consumo de materiales no orgánicos, fundamentalmente agrotóxicos, cifra que resulta superior a los valores encontrados para los casos de estudio I y II (27,09 y 21,50 %, respectivamente).

Niccolucci *et al.* (2008) reportaron que en el sistema tradicional de cultivo de la caña de azúcar el consumo de portadores energéticos presentó el 76 % del total de insumos productivos debido a la elevada demanda de combustible fósil para las labores de roturación, siembra, atenciones culturales, cosecha y transportación. Este valor resulta superior en comparación con ambos casos de estudio debido al empleo de la tracción animal y el trabajo manual en las actividades de siembra, fertilización y control de plantas arvenses, lo que representa un ahorro de combustible del 59 %.

Por su parte, Soja *et al.* (2010) determinaron que los mayores valores, en un 61 %, correspondieron al consumo de portadores energéticos (31 %) y de materiales no orgánicos (30 %). En relación a los casos de estudio, estos resultados son superiores,

relacionado directamente con la sustitución de la tecnología tradicional (mecanización), por el uso de alternativas más sanas (tracción animal y la mano de obra), sobre las labores de siembra, fertilización, así como el control de plantas arvenses, relacionado al cultivo de la caña de azúcar.

Quezada *et al.* (2013) identificaron los principales aspectos ambientales y su contribución a la huella del carbono, asociados a dos empresas agrícolas, resaltando los consumos de recursos forestales, portadores energéticos y los bienes intangibles o servicios externos recibidos, con valores de 238,001; 132,013 y 78,901 t CO₂-eq, los cuales representaron el 91,10, 23,03 y 14,12 % de la huella total, respectivamente.

Los programas de investigación e innovación en la agricultura comienzan a atender aceleradamente el desarrollo de tecnologías de adaptación al cambio climático, intentando reducir los riesgos productivos derivados de las emisiones de CO₂ al medio con afectaciones directas sobre el suelo, la atmósfera y el clima, el agua, la biodiversidad y el paisaje (Reinoso *et al.*, 2015). Medidas encaminadas hacia la mitigación de dichos gases, mediante la implementación de tecnologías de producción más limpias, posibilita en gran medida la

reducción de la huella del carbono (Phelps *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

1. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las emisiones de CO₂-eq hectáreas entre ambos casos de estudios.

2. El consumo de portadores energéticos, de materiales no orgánicos, de gases industriales empleados en las actividades de soldaduras autógenas oxiacetilénicas, así como el uso del suelo son los aspectos ambientales con mayor peso en la magnitud de la huella del carbono en ambos casos de estudios, con valores porcentuales superiores al 11 % respecto al total de emisiones de CO₂-eq.

3. La conducción de este tipo de estudios a mayor escala espacio-temporal, permite corroborar la pertinencia de la estimación de la huella del carbono como indicador para evaluar la sostenibilidad ambiental y económica de los sistemas productivos en el sector cañero, desde una perspectiva holística e integradora.

BIBLIOGRAFÍA

CARBALLO, A., GARCÍA-NEGRO, M., DOMÉNECH, J. L. El Método Compuesto de las Cuentas Contables, una alternativa metodológica para estimar la huella corporativa del carbono (HCC). *Revista Desarrollo Local Sostenible*, 2 (5): 10-16, 2009.

CRESPO, R.L., GONZÁLEZ, H.M., SANTANA, A.I., GUILLÉN, L.S. *Instructivo técnico para el manejo de la caña de azúcar*. Instituto de investigación de la caña de azúcar, La Habana, Cuba. 2014.

DOMÉNECH, J.L. *Huella Ecológica y desarrollo sostenible*. AENOR Ediciones (Asociación Española de Normalización y Certificación), Madrid, España. 2010, 400 p. ISBN: 978-84-8143-222-0.

DOMÉNECH, J.L., Carballo, A., Jiménez, L., De la Cruz, J.L. *Estándares de huella de carbono MC3*. CONAMA 10, Gijón, España. 2010a, 19 p.

ESPÍNDOLA, C. y VALDERRAMA, J.O. Huella del carbono. Parte 2: la visión de las empresas, los cuestionamientos y el futuro. *Información Tecnológica*, 23 (1): 177-192, 2012.

GUEVARA, A., GUZMÁN, N. y MARTÍN, P. Estudio de herramientas adecuadas para medir las emisiones de gases de efecto invernadero municipales. Congreso Nacional del medioambiente, del 22 al 26 de noviembre, Madrid, España, 2010.

NC-ISO 14001. *Sistema de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso*. La Habana, Cuba. 2015, 48 p.

MATOS, N. e IGLESIAS, C. Modelo económico-matemático para la organización racional de los medios técnicos en la cosecha-transporte-recepción de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21 (3): 49-54, 2012.

NICCOLUCCI, V., GALLI, A., KITZES, J., PULSELLI, R. M., BORSA, S. and MARCHETTINI, N. Ecological Footprint analysis applied to the production of two Italian wines. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, (128): 162-166, 2008.

PANEQUE, P., FERNÁNDEZ, H.C. y DONIZETTE, A. Comparación de cuatro sistemas de labranza/siembra con relación a su costo energético. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 11 (2):1-6, 2002.

PHELPS, J., WEBB, E.L. and AGRAWAL, A. Does REDD+ Threaten to Recentralize Forest Governance? *Science*, 328: 312-313, 2010.

QUEZADA, K.B., BALL, R.J., CULLEN, R. and BIGSBY, H.R. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, Vol. 27: 149-160, 2013.

REINOSO, M., MARTÍNEZ, Y. y RIECHE, Y. La Huella Ecológica del Sector Agrario en Villa Clara. Una aproximación cualitativa. *Centro Agrícola*, 42 (1): 53-61, 2015.

RICO, O., PEÑALVER, Y., LEIVA, J. y GONZÁLEZ, V. Efecto del tiro directo de la caña en el rendimiento y la eficiencia energética. *Centro azúcar*, 40 (4): 77-82, 2013.

ROJAS, J. y CONCHA, A. Diseño de experimento para el cálculo teórico de emisiones de CO₂, generadas por cuatro tipos de preparación del suelo, para un cultivo de caña de azúcar. Universidad ICESI Facultad de Ingeniería, Maestría en Ingeniería Industrial. Santiago de Cali, 2011.

STEINFELD, H., GERBER, P., WASSENAAR, R., CASTEL, V., ROSALES, M. and De Haan, C. Livestock's long shadow: environmental issues and options. FAO, UN. Rome, Italy, 2006. En sitio web: <http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.HTM> Consultado el 10 de junio de 2016.

SOJA, G., ZEHETNER, F., RAMPAZZO-TODOROVIC, G., SCHILDBERGER, B., HACKLD, K., HOFMANN, R. [et al.]. Wine production under

climate change conditions: mitigation and adaptation options from the vine yard to the sales booth. 9° European IFSA Symposium. 4-7 July, Vienna, Austria, 2010.

WACKERNAGEL, M. and REES, W.E. *Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers, Gabriola Island, British Columbia, Canada. 1998, 176 p. ISBN: 9780865713123.

Recibido el 8 de junio de 2016 y aceptado el 10 de noviembre de 2016