# Evaluación del impacto ambiental del proceso de obtención de alcohol carburante utilizando el algoritmo de reducción de residuos

*María Isabel Montoya R.[a], Julián Andrés Quintero S.[a], Óscar Julián Sánchez T.[b], Carlos Ariel Cardona A.[a, *]*

(Recibido el 28 de junio de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

a Grupo de Investigación en Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia. Carrera 27 N.º 64-60. Manizales, Colombia.

b Grupo de Investigación en Alimentos y Agroindustria. Universidad de Caldas. Calle 65 N.º 26-10. Manizales, Colombia.

## Resumen

En el presente trabajo se evalúa el desempeño ambiental de dos procesos para la obtención de etanol a partir de materias primas propias del país como el maíz y la caña de azúcar. Inicialmente se realizó la simulación de los procesos en el *software* comercial Aspen Plus. Obtenidos los balances de materia y energía de los procesos, se efectuó el análisis de impacto ambiental utilizando el algoritmo de reducción de residuos (algoritmo WAR), el cual evalúa la amigabilidad ambiental de un proceso. De los resultados obtenidos, el proceso a partir de maíz presenta un menor potencial de impacto ambiental de salida que el proceso a partir de caña de azúcar. Igualmente, la mayor generación de impacto ambiental en ambos procesos se da en la categoría de potencial de toxicidad acuática, debido principalmente a la elevada carga orgánica que involucran las vinazas producidas en este proceso.

---------- *Palabras clave:* alcohol carburante, algoritmo WAR, evaluación de impacto ambiental.

# Environmental impact assessment for ethanol production process using the waste reduction algorithm

## Abstract

The environmental performance of ethanol production from maize and sugar cane was evaluated. Process simulation was initially conducted using the commercial process simulator Aspen Plus. After mass and energy balances, analysis of the

* Autor de correspondencia. Teléfono: +57+6+881 00 00, extensión 417. Correo electrónico: ccardonaal@unal.edu.co (C. A. Cardona A.).

environmental impact was carried out using the waste algorithm reduction (WAR), which evaluates the environmental friendliness of each process. It was found that ethanol production from maize shows a lower potential environmental impact than that from sugar cane. The larger environmental impact of both processes occurs in the aquatic toxicity category, primarily due to high organic charge of the stillage produced.

---------- *Key words:* fuel ethanol, WAR algorithm, environmental impact assessment.

## Introducción

En la actualidad el uso del etanol como carburante reviste especial importancia no sólo con el fin de disminuir la dependencia del petróleo y enfrentar la crisis energética, sino también como una manera efectiva de contribuir a la reducción del gran impacto ambiental generado por los combustibles derivados del petróleo.

En Colombia, la pérdida de la autosuficiencia de combustibles fósiles, la importación de crudo para abastecer las refinerías y el cumplimiento de la legislación ambiental [1] que obliga para el año 2005 a cumplir con unos estándares de producción limpia [2] ha llevado a considerar el etanol como la solución más viable para sustituir parte de las importaciones de gasolina y mejorar la calidad del aire de nuestras ciudades. De ahí la necesidad de evaluar desde el punto de vista ambiental, los procesos para la producción de etanol a partir de recursos agrícolas propios del país, como la caña de azúcar y el maíz.

El punto de partida para satisfacer los estándares de producción limpia es el diagnóstico ambiental del proceso industrial, a fin de determinar las oportunidades de prevención y reducción en el origen de la contaminación y las alternativas viables para realizar dicha reducción. Es así como en las últimas cuatro décadas el diseño de procesos y la manufactura de sustancias químicas han experimentado gran evolución en este sentido. Inicialmente los sistemas de reacción y separación eran diseñados y optimizados sólo con un objetivo económico. En los años setenta y ochenta del siglo pasado, debido a la crisis global energética, el sistema de servicios fue incluido entre los procesos de diseño y optimización. Hoy, bajo el esquema de producción limpia, deben tenerse en cuenta en forma adicional al objetivo económico y energético, tanto la consideración de los impactos ambientales del proceso, así como otras etapas del ciclo de vida del producto.

La minimización de residuos se ha estudiado extensamente en la industria y los círculos académicos, como una de las herramientas para alcanzar la producción limpia y contribuir al desarrollo sostenible. Esta herramienta incorpora tanto la reducción en la fuente como el uso de reciclos para reducir las cantidades y riesgos de los residuos; sin embargo, no diferencia entre residuos peligrosos y no peligrosos. En este sentido, la minimización del impacto ambiental es una norma más estricta y aunque tiene alcances similares a los de la minimización de residuos, resalta más los diferentes impactos de las especies químicas sobre el ambiente (figura 1) [3].

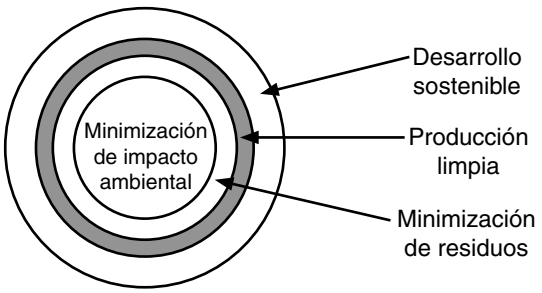


**Figura 1** Alcances del desarrollo sostenible [3]

La evaluación del impacto ambiental de un proceso puede ser vista como un problema de decisión que involucra dos niveles: índices de inspección del proceso e indicadores de desempeño ambiental en cuanto a las especies químicas. Siendo la base de los índices de inspección, los indicadores de desempeño ambiental ofrecen suficiente flexibilidad para considerar el destino de todos los componentes involucrados y sus posteriores impactos. Dichos impactos están enmarcados en un grupo de categorías, es decir, los índices de desempeño ambiental muestran el impacto con que contribuye el proceso en una determinada categoría. Diferentes autores han propuesto la medición de varias categorías de impacto, como se puede observar en la tabla 1.

La metodología de análisis del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) es una herramienta de análisis sistemática que considera los impactos ambientales de productos o servicios y provee una estructura de referencia para el desarrollo de índices de inspección, es-

pecialmente en la extensión de las fronteras del sistema hacia las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto. Sin embargo, la aplicación de esta metodología es muy compleja durante el diseño conceptual de un proceso donde sólo se dispone de información limitada y altamente incierta. Considerando la reducida información en la etapa de diseño, los índices de inspección deben poder basarse en simples balances de materia. Los índices ambientales desarrollados por Heinzie et al. [4], que consideran los diferentes niveles de decisión en el diseño conceptual, se basan en pérdidas de masa. En forma similar, los modelos ecotoxicológicos desarrollados por Elliott et al. [5] también se basan en unidades de masa en lugar de concentración. El algoritmo de reducción de residuos (algoritmo WAR, por sus siglas en inglés) propuesto por Hilaly y Sikdar [6] se fundamenta en el concepto de balance de potencial de impacto ambiental (PEI, por sus siglas en inglés). El balance de energía rara vez se incluye en esta etapa, aunque otros autores como cabezas y colaboradores [7, 8, 9] lo han tenido en cuenta.

En el presente, es quizás el algoritmo WAR el índice más práctico para evaluar y comparar la amigabilidad ambiental de diferentes procesos industriales.

**Tabla 1** Algunas categorías de impacto

| ***Categorías de impacto*** | ***David & Kincaid et al., 1993*** | ***Stefanis et al., 1996*** | ***Cabezas et al., 1997*** | ***Young & Cabezas, 1999*** | ***SETAC Barbara et al., 1995*** |
|---|---|---|---|---|---|
| Consumo de energía | | | | √ | |
| Consumo de recursos | | | | | √ |
| Efecto invernadero | | √ | √ | √ | √ |
| Deterioro de la capa de ozono | | √ | √ | √ | √ |
| Acidificación | | | √ | √ | |
| Eutrofización (terrestre y acuática) | | | | | √ |
| Smog fotoquímico | | √ | √ | √ | |
| Toxicidad humana | √ | √ | √ | √ | √ |
| Ecotoxicidad (terrestre, acuática) | √ | √ | √ | √ | √ |
| Área usada y diversidad de especies | | | | | √ |
| Olor | | | | | √ |
| Ruido | | | | | √ |

*Fuente:* véase referencia [3].

La metodología del algoritmo WAR, desarrollada por el *National Risk Management Research Laboratory* de la Agencia de Protección Ambiental de Estado Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), propone añadir una relación de conservación sobre el PEI basado en los flujos de impacto de entrada y salida del proceso. En este contexto se entiende el PEI de una cantidad dada de materia o energía, como el efecto que esta materia y energía tendría en promedio sobre el ambiente si ellos fueran descargados fuera del proceso. Dado que esta definición implica que el impacto es una cantidad aún no realizada el PEI es de naturaleza probabilística. Así, los potenciales de impacto ambiental de una industria química son generalmente causados por la energía y la materia que el proceso adquiere o emite al ambiente.

Las categorías de impacto evaluadas por el algoritmo WAR [10, 11] se dividen en dos grupos: atmosférica global y toxicológica global. Las categorías de impacto atmosférico global son: potencial de calentamiento global (GWP), potencial de agotamiento de ozono (ODP), potencial de acidificación o lluvia ácida (AP) y oxidación fotoquímica o potencial de formación de smog (PCOP). Las categorías de impacto toxicológico global son: potencial de toxicidad humana por ingestión (HTPI), potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica (HTPE), potencial de toxicidad acuática (ATP) y potencial de toxicidad terrestre (TTP).

El algoritmo WAR maneja dos clases de índices para evaluar el impacto ambiental de una industria química. La primera clase mide el PEI emitido por el proceso y la otra mide la generación de PEI en el proceso. Dentro de cada clase se definen dos índices principales: los de impacto total de salida (expresado como potencial de impacto por unidad de tiempo) y los de impacto por masa de producto.

La primera clase de índices, caracteriza el PEI emitido por el sistema y su principal uso consiste en resolver preguntas acerca de la eficiencia ambiental externa del proceso, es decir, la habilidad de la planta para producir productos deseados a un mínimo potencial de impacto ambiental de descarga. La segunda clase de índices caracteriza el PEI generado por el sistema y su importancia radica en la determinación de la eficiencia ambiental interna del proceso, es decir, cuánto PEI se está generando o consumiendo en el proceso. Entre más pequeño sea el valor de estos índices, el proceso es más eficiente ambientalmente. Dado que este valor depende de la capacidad de la planta, debe usarse el índice por masa de producto si se desea evaluar el potencial de impacto ambiental independientemente del tamaño de la planta, lo cual es muy útil para efectos de comparación entre diferentes plantas o configuraciones tecnológicas de un proceso.

En un trabajo previo Cardona et al. [12] evaluaron el desempeño ambiental mediante el algoritmo WAR, de diferentes alternativas de proceso para la producción de alcohol carburante a partir de materias primas lignocelulósicas (material herbáceo, astillas de madera, bagazo de caña y papel residual) y amiláceas (maíz, trigo, yuca), los resultados obtenidos mostraron menor impacto para los procesos a partir de almidón debido a que los procesos a partir de biomasa involucran una etapa de pretratamiento donde se utilizan ácidos, los cuales tienden a aumentar el PEI.

## Proceso de obtención de etanol

En el ámbito mundial las materias primas más utilizadas para la producción de etanol son los cereales (especialmente el maíz) y la caña de azúcar, siendo los primeros más usados en Europa y Norte América, y la caña en Brasil (mayor productor de etanol en el ámbito mundial), la India y demás países tropicales [13].

El proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar comprende la extracción del jugo de caña (rico en azúcares), su acondicionamiento para hacerlo apropiado a las levaduras que realizan la fermentación y la separación del producto. En esta última etapa, la remoción de biomasa celular del caldo de cultivo, da paso a la concentración del etanol mediante operaciones unitarias y a su posterior deshidratación, forma en que es utilizado como aditivo oxigenante.

Para el proceso de obtención de etanol a partir de maíz es necesario hidrolizar las cadenas de amilosa y amilopectina presentes en el almidón, obteniendo azúcares apropiados para la fermentación con levaduras. La degradación del almidón se lleva a cabo por procesos enzimáticos, después de un paso de gelatinización donde se solubiliza el almidón con el fin de hacerlo más accesible a las enzimas degradadoras de este biopolímero (amilasas). El jarabe de glucosa resultante es el punto de partida para la fermentación alcohólica, donde se obtiene una solución acuosa que debe ser enviada a la etapa de recuperación de producto, tal como en el caso de la caña de azúcar.

El objetivo del presente trabajo es evaluar y comparar el desempeño ambiental de los procesos de obtención de etanol a partir de dos materias primas potenciales en el país, el maíz y la caña de azúcar, siendo esta última la más perspectiva para operar las plantas de alcohol carburante en Colombia.

## Metodología

Para la evaluación de impacto ambiental del proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz se realizó primero la simulación de los esquemas tecnológicos correspondientes, expuestos por Montoya y Quintero [14]. La simulación se llevó a cabo mediante el software comercial Aspen Plus versión 11.1 (Aspen Technologies, Inc., EUA), para una planta de producción de 537.720 L/d de etanol, que trabaja en régimen continuo para cada una de las materias primas analizadas.

El proceso a partir de caña de azúcar (figura 2) consta de lavado y extracción del jugo de caña, esterilización, fermentación, concentración del etanol por destilación, deshidratación por adsorción con tamices moleculares y concentración de vinazas. Otras formas de disposición de las vinazas consisten en la irrigación de las plantaciones de caña, el biocompostaje, la recirculación, la incineración previa concentración [15] o tratamientos biotecnológicos para remover la alta carga orgánica de estos efluentes ($DBO_5$ = 30.000-60.000 mg/L). Dentro de estos últimos, para el tratamiento de vinazas de caña, se han probado la digestión anaerobia, el reactor anaeróbico de manto de lodos de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés), los lodos activados, los filtros de goteo y las lagunas de tratamiento [16].

El proceso a partir de maíz (figura 3) está compuesto de lavado, molienda del grano, licuefacción del almidón, sacarificación y fermentación simultáneas, concentración del etanol por destilación, deshidratación por adsorción con tamices moleculares y producción de granos secos de destilería con solubles (DDGS, por sus siglas en inglés) como forma de tratamiento de vinazas, el cual es un subproducto con alto contenido proteico utilizado en alimentación animal. En 2004, las plantas productoras de etanol en Es-

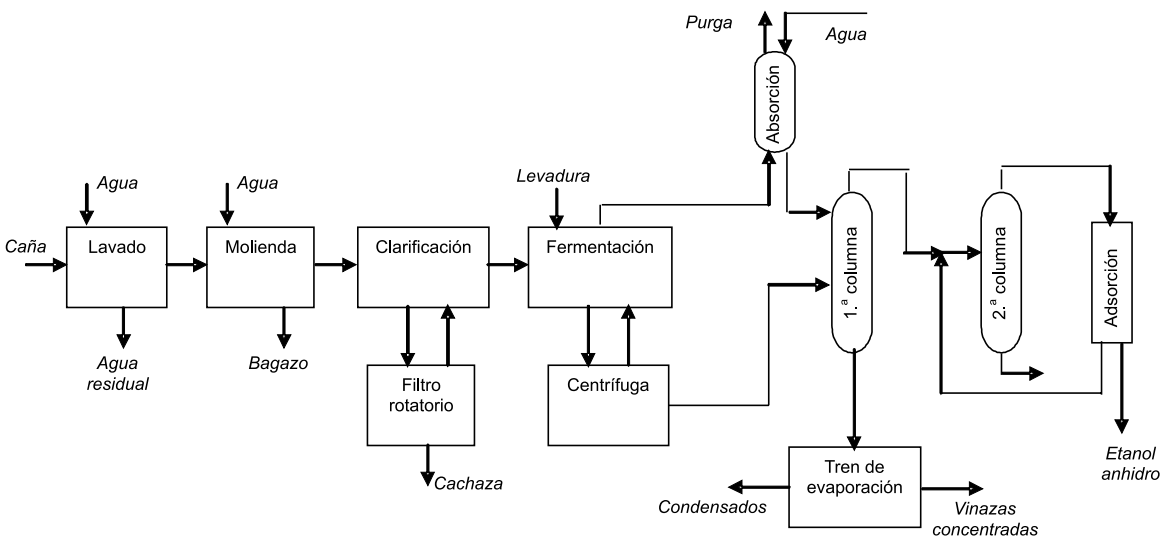


**Figura 2** Esquema del proceso de obtención de etanol a partir de caña. Las columnas corresponden a las torres de destilación para concentrar el etanol hasta cerca del 95% en peso

tados Unidos que emplean la molienda en seco del maíz, produjeron 7,3 millones de toneladas de DDGS, de las cuales cerca de un millón de toneladas se exportaron principalmente a Irlanda, Reino Unido, el resto de Europa, México y Canadá [17].

Para minimizar los costos de este tratamiento, se recicla una porción de las vinazas ligeras las cuales constituyen la fracción líquida de las vinazas enteras obtenidas después de la centrifugación. Estas vinazas ligeras recicladas son usadas para reemplazar un porcentaje del agua usada durante la hidrólisis del almidón. En la industria se conoce esta operación de reciclaje como *backsetting* y las vinazas recicladas como *backset* [18].

Determinados los balances de materia y energía para cada proceso, se procedió a realizar la evaluación de impacto ambiental utilizando el algoritmo WAR. Para su aplicación se empleó el *software* WARGUI, desarrollado por la EPA y modificado en un trabajo previo [10]. Este programa puede ser acoplado con el simulador de procesos Aspen Plus [3, 10, 19, 20], de tal forma que los datos sobre las sustancias involucradas en el proceso y los flujos másicos del mismo son tomados directamente del simulador.

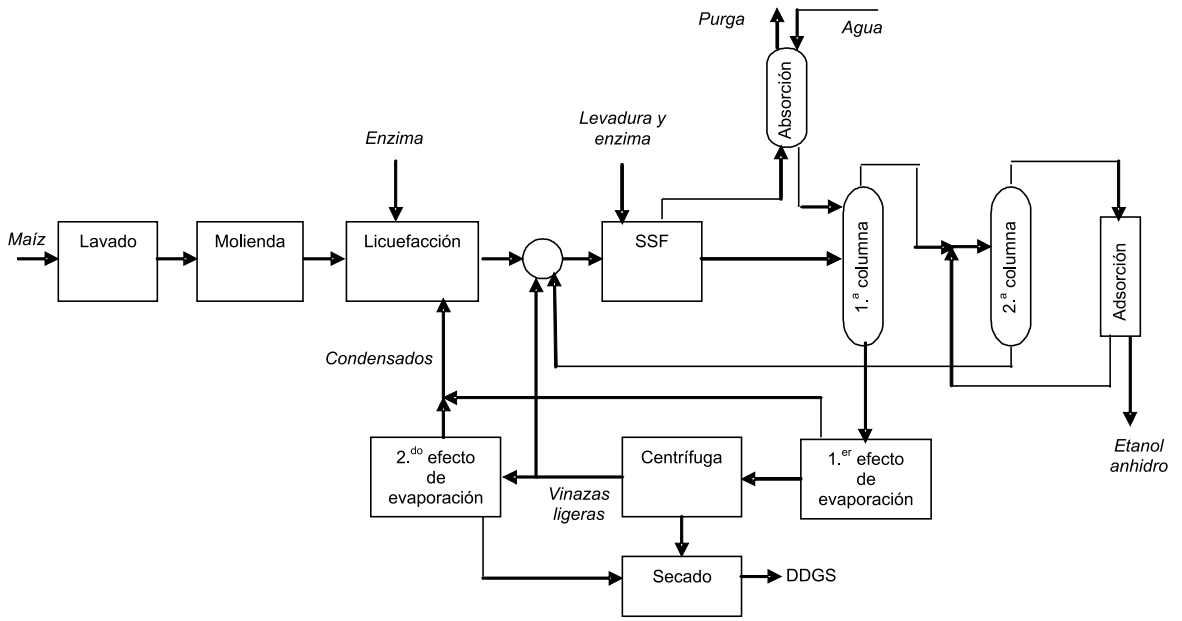


**Figura 3** Esquema del proceso de obtención de etanol a partir de maíz. Las columnas corresponden a las torres de destilación para concentrar el etanol hasta cerca del 95% en peso

## Resultados y discusión

En la figura 4 se presentan los resultados de los índices de PEI total para cada proceso. Se observa que el proceso a partir de caña tiene un PEI de salida mayor que el de maíz, ya que en este último la generación de PEI es mucho más negativa. Lo anterior indica que en el proceso a partir de maíz se disminuye el potencial de impacto de las sustancias que ingresan mediante su transformación en otras menos perjudiciales. Además, el hecho de que los requerimientos de materia prima en el proceso a partir de caña sean casi seis veces los de maíz, hacen que el potencial de impacto ambiental de entrada en este proceso sea mayor. En la figura también se observa que debido a que las capacidades de ambas plantas son similares, el PEI en función del tiempo y por masa de producto

guardan las mismas proporciones. Por lo anterior, sólo se considerará los PEI por tiempo para los resultados que se presentan a continuación.

En la figura 5 se muestran todas las categorías de impacto consideradas por la metodología WAR. En esta figura se observa que las categorías que contribuyen en mayor proporción con el PEI de salida para ambos casos son el potencial de toxicidad humana por ingestión (HTPI) y el potencial de toxicidad terrestre (TTP). Estas dos categorías están estrechamente relacionadas ya que ambas se calculan en función de la dosis letal a través de ingestión que mataría el 50% de una muestra de ratas ($LD_{50}$); casi todos los componentes involucrados en ambos procesos contribuyen a estas categorías, aunque unos en mayor proporción que otros. Como ejemplo se encuentra el amoníaco, el cual posee un $LD_{50}$ de 350 mg/kg, mientras que el glicerol presenta un valor de 12.600 mg/kg, lo que hace del amoníaco el mayor contribuyente a estas categorías de impacto.

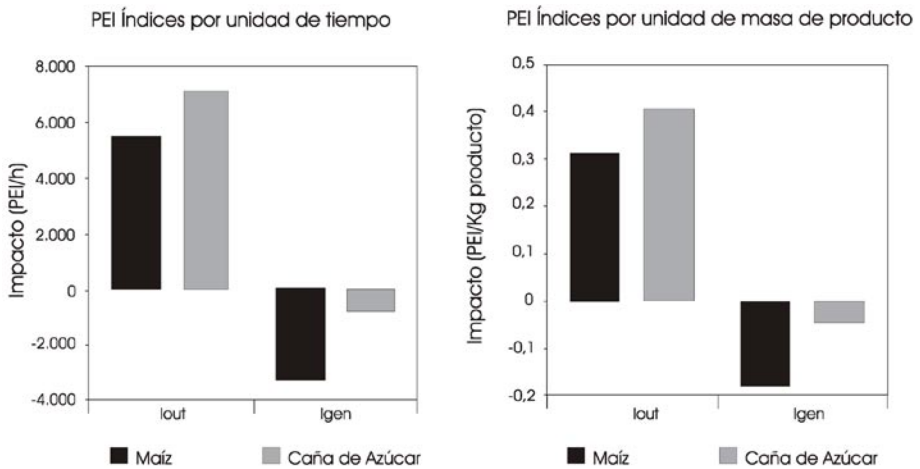


**Figura 4** Potencial de impacto para los dos casos de estudio. $I_{out}$: PEI de salida, $I_{gen}$: PEI de generación. a) PEI por unidad de tiempo b) PEI por masa de producto

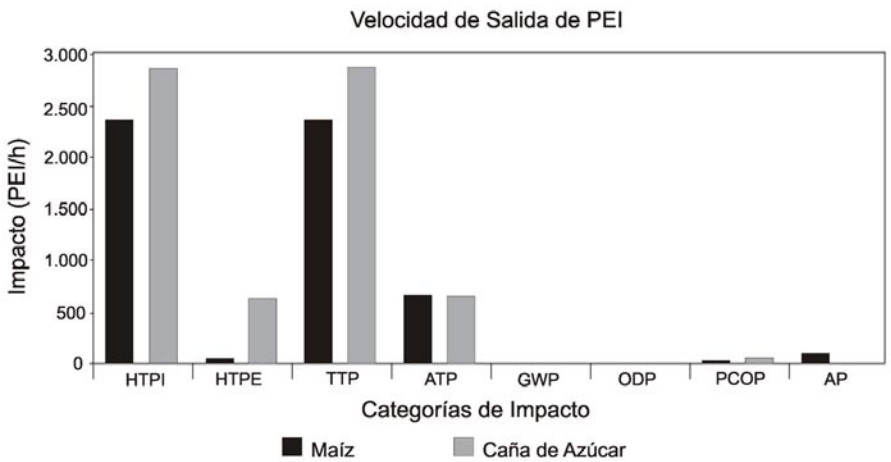


**Figura 5** Potencial de impacto de salida por categoría para los dos casos de estudio

En cuanto a las demás categorías, el potencial de impacto ambiental es menor, siendo en su orden el potencial de toxicidad acuática (ATP), influenciado principalmente por la alta carga orgánica de las vinazas, el potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica (HTPE), potencial de acidificación (AP), potencial de oxidación fotoquímica (PCOP), potencial deterioro de la capa de ozono (ODP) y potencial calentamiento global (GWP). Es de aclarar que para este estudio se dio igual importancia a cada una de las categorías evaluadas. La asignación de pesos de importancia a cada categoría es una herramienta útil cuando se quiere determinar el potencial de impacto sobre una región específica. Esta ponderación generalmente se realiza cuando se ha determinado la zona de ubicación de la planta y se quiere saber el nivel de impacto de acuerdo con las condiciones específicas del lugar.

En la figura 6 se observa que la categoría en la que se presenta mayor generación de impacto al interior de la planta es el potencial de toxicidad acuática (ATP), la cual se calcula en función de la concentración letal que causa la muerte en el 50% de los especímenes de prueba ($LC_{50}$). Este resultado concuerda con el hecho de que unos de los principales contaminantes generados en las destilerías son las llamadas vinazas, gracias a su alto contenido orgánico. Los demás potenciales de impacto que se generan durante el proceso son el potencial de oxidación fotoquímica (PCOP), potencial deterioro de la capa de ozono (ODP) y potencial calentamiento global (GWP), todos relacionados con la producción de $CO_2$ durante la fermentación. Los valores negativos en las demás categorías representan una disminución de los potenciales de impacto con respecto a los potenciales de impacto de entrada, mediante la transformación de sustancias contaminantes en otras menos contaminantes dentro del proceso.

El vertimiento de las vinazas en los cursos de aguas naturales provocaría una alta demanda de oxígeno lo que pondría en peligro la vida acuática, de ahí la necesidad de utilizar métodos apropiados de tratamiento como los mencionados anteriormente.

En esta metodología de evaluación de impacto ambiental, también es posible incluir el proceso de generación de energía, este análisis viene dado según el tipo de combustible utilizado. El software WAR GUI incluye en su base de datos carbón, petróleo o gas natural como materias primas para la generación de energía.

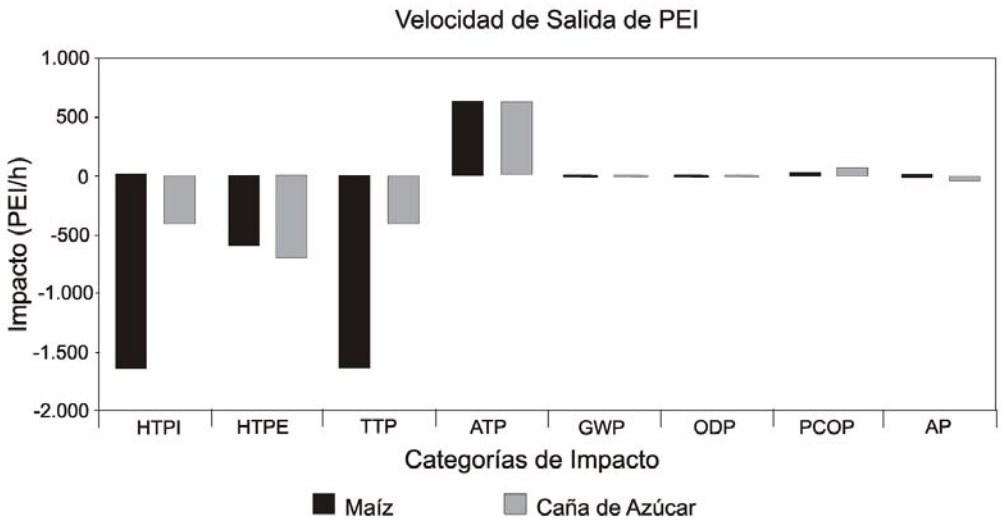


**Figura 6** Potencial de impacto generado por categoría para los dos casos de estudio

La energía térmica requerida para la producción de etanol a partir de caña de azúcar se obtiene principalmente de la combustión del bagazo y de gas natural en el proceso a partir de maíz [20]. En el caso de producción de etanol a partir de maíz el combustible se encuentra disponible en el WAR GUI mientras para el proceso a partir de caña de azúcar no. El combustible que más se aproximaría al bagazo (en función de su estado sólido y algunos componentes) sería el carbón, pero su uso implicaría la liberación de una cantidad de gases de combustión (NOx, $CO_2$, $SO_2$, etc.) que contribuirían con el aumento, en una gran proporción, del potencial de impacto ambiental total representado principalmente por la categoría AP debido a la formación de $SO_2$. Aunque la combustión del bagazo no está exenta de liberar este tipo de gases, la contribución en masa no sería tan grande como la del carbón y por tanto el potencial de impacto representado por el carbón no es comparable al del bagazo.

Por estas razones se decidió no tener en cuenta el análisis energético para los efectos de comparación de potencial de impacto ambiental de los dos casos estudiados. Para futuros trabajos se espera realizar una evaluación más rigurosa en la que se considere la combustión del bagazo, es decir, se tengan en cuenta todos los gases producto de su combustión.

## Conclusiones

En el proceso de obtención de etanol a partir de maíz se genera menor cantidad de vinazas por litro de etanol, lo que se refleja en un menor PEI. Lo anterior se explica por el uso del proceso de sacarificación y fermentación simultáneas, que permite una corriente de entrada al fermentador más concentrada. En contraste, en el proceso a partir de caña es necesaria mayor dilución del jugo de caña para evitar la inhibición de la levadura por sustrato, lo que provoca mayor generación de aguas residuales.

Aunque ambientalmente el proceso de obtención de etanol a partir de maíz es el más limpio, no se puede considerar como el más apropiado para la implementación industrial, pues aparte de este indicador ambiental es necesario evaluar también la factibilidad económica del proyecto y ponderar la importancia relativa de cada uno de estos factores.

La evaluación del impacto ambiental causado por un proceso mediante la metodología WAR permite al ingeniero identificar los posibles impactos que conllevará la operación de una planta de procesos químicos o biotecnológicos desde su diseño e identificar aquellas partes en las plantas ya existentes donde es necesario realizar un estudio profundo en busca de la minimización de tal impacto. Este tipo de consideraciones desde las primeras etapas de diseño permite generar esquemas de proceso más amigables ambientalmente y evitar costosas modificaciones dentro de la planta en orden de alcanzar las especificaciones ambientales requeridas.

La aplicación de esta metodología a los procesos de obtención de etanol que se piensan implementar en el país y en general a plantas ya existentes, podría ser un indicador de gran utilidad para las autoridades ambientales gubernamentales que deben regular los impactos emitidos por las industrias. En este orden de ideas, asignar pesos de importancia a las categorías de acuerdo con el lugar específico de ubicación de la planta podría resultar en un buen indicador de desempeño ambiental del proceso en un entorno dado.

## Referencias

1. Ministerio de Minas y Energía. *Ley 693 de 2001.*
2. A. Acosta. *El gran De*safío. Cali, 17 de junio de 2003. http://www.amylkaracosta.com/html/01-2003.htm. Consultada en junio de 2004.
3. Y. Yang, L. Shi. "Integrating environmental impact minimization into conceptual chemical process design: a process systems engineering review". En: *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 24. 2000. pp. 1409-1419.
4. E. Heinzle, D. Weirich, F. Brogli, V. H. Hoffmann, G. Koller, M.A. Verduyn, K. Hungerbuhler. "Ecological and economical objective functions for screening in integrated development of fine chemical processes".

*Industrial & Engineering Chemistry Research.* Vol. 37. 1998. pp. 3395-3407.

5. A. D. Elliott, B. Sowerby- B.D. Crittenden **"**Quantitative environmental impact analysis for clean design". *Computers Chem. Eng.* Vol. 20. 1996. pp. 1377-1382.
6. A. H. Hilaly, S. K. Sikdar. "Pollution balance: a new methodology for minimizing waste production in manufacturing processes". *Journal of the Air & Waste Management Association.* Vol. 44. 1994. pp. 1303-1308.
7. D. G. Young, H. Cabezas. "Designing sustainable process with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm". *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 23. 1999. pp. 1477-1491.
8. S. K. Mallick, H. Cabezas, J.C. Bare, S.K. Sikdar. "A Pollution Reduction Methodology for Chemical Process Simulators". *Ind. Eng. Chem. Res*. Vol.35. 1996. pp. 4128-4138.
9. S. K. Mallick, J.C. Bare. "Pollution prevention with chemical process simulators: the generalized waste reduction (WAR) algorithm-full version". *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 23. 1999. pp. 623-634.
10. C. A. Cardona, V. F. Marulanda, D. Young. "Analysis of the environmental impact of butylacetate process through the WAR algorithm". *Chemical Engineering Science.* Vol.59. No.24. 2004 pp. 5.839 – 5.845.
11. Tutorial Software WAR GUI.
12. C. A. Cardona, O. J. Sánchez, "Analysis of fuel ethanol production processes using lignocellulosic biomass and starch as feedstocks". *7th World Congress of Chemical Engineering, July 10-14 2005.* Glasgow, Scotland, UK (Accepted for presentation).
13. A. Wheals et al. "Fuel ethanol after 25 years". *TIBTECH* Vol. 17. 1999. pp. 482-487.
14. M. I. Montoya, J. A. Quintero. *Esquema tecnológico integral de la producción de bioetanol carburante*. Trabajo de grado Universidad Nacional de Colombia, Manizales 2005. pp. 71-96.
15. Merrick & Company. *Wastewater Treatment Options for the Biomass-To-Ethanol Process*; NREL Subcontract AXE-8-18020-01, Final Report, Aurora, CO, 10/20/98.
16. The Sugar Sector Environmental Report. *Environmental Technology Program for industry*. 2003. http://www.cpp.org.pk/etpirpt/SugarSectorReport.pdf. Consultada en enero de 2004.
17. Renewable Fuels Association. *Homegrown for the homeland. Ethanol Industry Outlook 2005*. http://www.ethanolrfa.org/ outlook2005. Consultada en febrero de 2005.
18. A. Mcaloon, F. Taylor, W. Yee, K. Ibsen, R. Wooley. *Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*. National Renewable Energy Laboratory Biotechnology Center for Fuels and Chemicals October 2000. NREL/TP-580-28893.
19. X. Li., A. Kraslawski. "Conceptual process synthesis: past and current trends". *Chemical Engineering and Processing*. Vol. 43. 2004 pp. 589-600.
20. D. Young, H. Cabezas. *Sustainability in Chemical Manufacturing Processes: WAR algorithm*. U.S. Environmental Protection Agency. 26 W. Martin Luther King Dr. Cincinnati, Ohio 42268, USA. pp. 1-36.