

¿Es la biogasolina una alternativa ambiental en Colombia?

*William Andrés Ocampo Duque**

Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Grupo de Análisis y Gestión Ambiental, Universidad Rovira i Virgili, España.

(Recibido el 20 de marzo de 2005. Aceptado el 17 de abril de 2006)

Resumen

El Ministerio de Minas y Energía aprobó la comercialización de biogasolina en Colombia a partir del día 1.º de noviembre de 2005. La biogasolina (gasohol o mezcla E10) es una mezcla que contiene 90% de gasolina y 10% de etanol en volumen. El etanol se origina a partir de la fermentación natural, luego de extraer los jugos de cultivos como la caña de azúcar, el maíz, el trigo o la yuca. Tanto el Gobierno nacional como los productores interesados han manifestado que la biogasolina se presenta como una alternativa para reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente que producen las grandes ciudades debido a la quema de combustibles fósiles en el sector del transporte. Sin embargo, en la literatura científica especializada la evidencia de efectos ambientales favorables por el uso de gasolina oxigenada con un 10% de etanol es escasa. Por el contrario, hay gran controversia a nivel mundial acerca del uso de este combustible modificado. En este trabajo se hace una extensa revisión científica en la que se muestra que la mezcla etanol-gasolina presenta cuestionables beneficios ambientales ya que puede incrementar la producción de contaminantes altamente tóxicos y *smog* fotoquímico, ofrece pocos beneficios en cuanto a reducciones de gases de efecto invernadero y sostenibilidad ambiental, además de incrementar el riesgo de la contaminación de las aguas subterráneas.

----- *Palabras clave:* combustibles alternativos, biogasolina, contaminación atmosférica.

Is biogasoline an environmentally-acceptable alternative in Colombia?

Abstract

Colombian government is currently promoting the commercialization and use of biogasoline in the country; this process started on November 1, 2005. Biogasoline

* Autor de correspondencia. Teléfono: +57+2+321 82 00, fax: +57+2+555 28 23, correo electrónico: willocam@puj.edu.co.

(gasohol or E10 blend) is an ethanol-gasoline blend with 10 v/v % of ethanol. Ethanol is being produced by fermentation of sugarcane, maize, wheat or cassava crops. Both the government and the ethanol manufacturers have defended the potential of biogasoline in reducing the environmental deleterious effects that result from the use of fossil fuels in the transportation sector. However, there is scarce evidence in the scientific literature of favorable environmental impacts due to the use of gasoline oxygenated with 10 v/v % ethanol. Moreover, there is a worldwide controversy about using this type of modified fuel. A detailed scientific review showing the questionable environmental benefits of ethanol-gasoline blends is presented in this work. Potential release of highly toxic pollutants, contribution to the formation of photochemical smog and greenhouse gases, environmental sustainability, and groundwater pollution risk issues resulting from the deployment of E10 fuels are widely discussed.

----- *Key words:* Alternative fuels, biogasoline, gasohol, air pollution.

Introducción

La Ley colombiana 693 de 2001 autorizó el uso de alcoholes carburantes en centros urbanos de más de 500 mil habitantes, con el propósito de reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos producidos en el sector del transporte [1]. La producción, distribución y comercialización de los alcoholes fue sometida a la libre competencia, por lo que cinco ingenios azucareros situados en la zona del Valle del Cauca, Cauca y Risaralda han construido plantas para la producción de más de un millón de litros diarios de etanol anhidro [2]. Este etanol se mezcla con la gasolina tradicional proveniente de las refinerías e ingresa a los canales clásicos de distribución, como se muestra en la figura 1. La producción de gasolina adicionada con etanol proveniente de la fermentación de jugos de caña de azúcar inició en noviembre de 2005 [3]. Otros proyectos para la producción de etanol a partir de remolacha, caña y yuca en otras regiones están en fase de estudio de viabilidad [4].

Aunque la política del alcohol carburante está cimentada en los principios de la sostenibilidad nacional, buscando incentivar la producción de energías renovables, existen algunos factores que no se han analizado a fondo. Los tipos de cultivos seleccionados para la producción de alcohol, así como las tecnologías involucradas presentan algunas desventajas que no se han manifestado y que en efecto podrían ser contraproducentes, tanto para el medio ambiente como para la economía de los consumidores. La tecnología de producción de etanol combustible tiene más de treinta años, por tanto mucho se puede aprender de las experiencias de los países que la han adoptado y de las investigaciones publicadas sobre el tema.

Así como esta tecnología muestra algunos beneficios, también en los últimos años se ha demostrado que presenta desventajas significativas que ponen en discusión el carácter ecológico, verde y limpio de este combustible [5-10]. Este artículo pretende mostrar algunos inconvenientes del uso de mezclas etanol-gasolina, los cuales han emergido a partir del uso de las técnicas recientes de evaluación del

desempeño ambiental de los productos, como el análisis de ciclo de vida y la evaluación de riesgo. El objetivo primordial es pues, motivar la investigación sobre los efectos ambientales, económicos y sociales a largo plazo que pueden resultar de la obligación de usar gasolina oxigenada con etanol en las ciudades colombianas.

Posibles impactos de la biogasolina en las emisiones de contaminantes atmosféricos

Uno de los argumentos básicos para el enriquecimiento de la gasolina con etanol es el hecho de la reducción en las emisiones de contaminantes atmosféricos [11-13]. El etanol introduce más oxígeno a la mezcla combustible mejorando la eficiencia de la combustión debido a la presencia de un átomo de oxígeno por molécula. Sin embargo, el proceso de combustión real es mucho más complejo y tales conclusiones podrían ser bastante apresuradas. Se ha demostrado que el uso de combustibles oxigenados en motores de combustión interna generalmente reduce las emisiones de hidrocarburos totales y monóxido de carbono (CO) a condiciones normales de temperatura, aunque en varios estudios se reporta que la magnitud global de la reducción puede ser poco significativa [14-19].

En efecto, la mezcla E10 puede generar menores emisiones de hidrocarburos totales y de monóxido de carbono (CO) que la gasolina [20]. Pero en contraste, se pueden presentar incrementos significativos en las emisiones de compuestos particulares muy peligrosos [21-26]. Por ejemplo, en ciudades brasileras se han reportado emisiones de acetaldehído sustancialmente mayores (hasta de un 700%) cuando se ha utilizado combustible E10 en vez de gasolina [19, 27-30]. También se reportan incrementos significativos en la concentración de formaldehídos en ciudades que usan mezclas E10 [26].

La combustión de etanol en motores de combustión interna produce acetaldehído y formaldehído [31]. Estos compuestos son más reactivos en la atmósfera que sus precursores. La reacción de

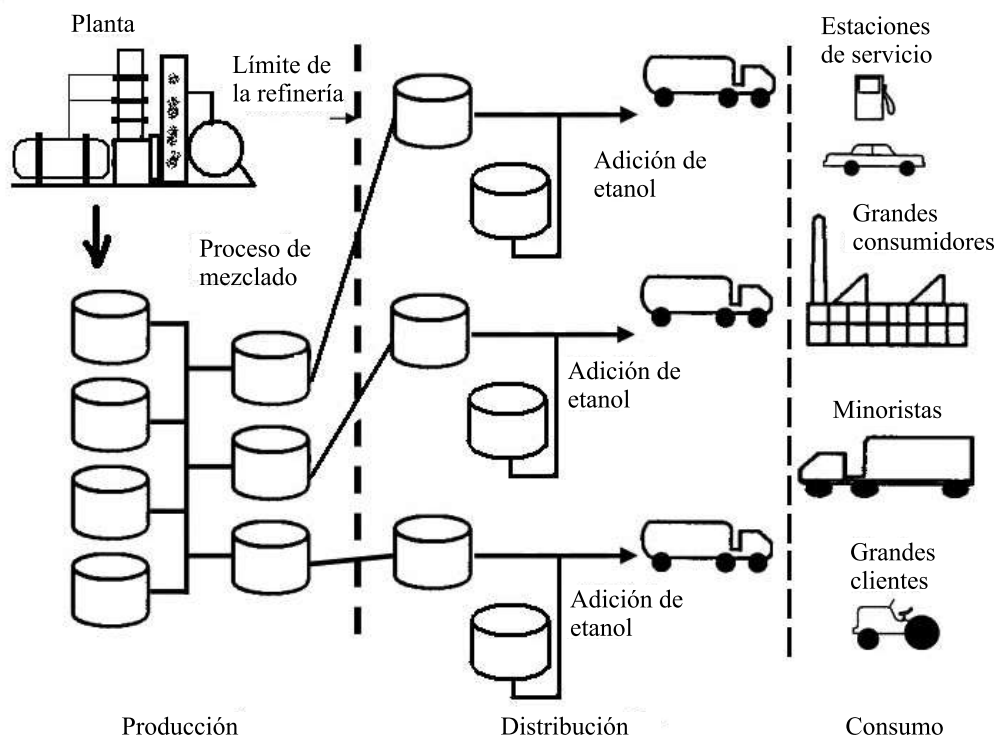


Figura 1 Diagrama típico para la integración de etanol en las cadenas de distribución de gasolina

acetaldehído con radicales libres OH produce radicales de peroxyacetil que pueden reaccionar con NO_2 para formar nitrato de peroxy-acetilo (PAN) [23]. Actualmente, ni los aldehídos ni el PAN están sujetos a regulaciones ambientales nacionales, pero se sabe que son sustancias altamente tóxicas, por lo que estudios de evaluación de riesgo ambiental deberían ser llevados a cabo. El PAN es altamente tóxico para las plantas [25]. El acetaldehído presenta probables efectos carcinogénicos y es un agente irritante para las mucosas respiratorias y con reconocida toxicidad para las plantas [32]. El formaldehído produce cáncer en animales y puede causar cáncer y enfermedades respiratorias y de la piel en humanos [32].

Se han reportado algunos estudios de la calidad del aire para ciudades que usan mezclas combustibles de etanol-gasolina. Brasil es el único país que utiliza etanol en importantes cantidades; en 1975 este país adoptó el uso de etanol como combustible

por causas muy similares a las que actualmente presenta Colombia. En la actualidad, entre el 70 y 75% de sus vehículos se mueve con gasolinas E25 (25% en volumen de etanol), unos 4 millones de vehículos transitan con etanol anhidro (E100) y el resto usa diésel [33]. En ciudades brasileras se han reportado niveles de acetaldehído y de formaldehído bastante mayores que los niveles que se pueden encontrar en cualquier otro lugar del mundo (hasta de 45,6 y 54,3 p. p. b., respectivamente) [21]. Estos niveles se atribuyen al poco control ambiental que se ejerce sobre las pérdidas por evaporación, más que a las emisiones producidas durante la combustión.

Los valores de riesgo carcinogénico para los aldehídos producidos por el uso de E10 se pueden observar en la tabla 1. Claramente, se puede aseverar que estos aldehídos son muy peligrosos para la salud de los ciudadanos, aun a bajas concentraciones. Recientemente, se realizó un

estudio sobre niveles de dioxinas y furanos presentes en ciudades brasileñas [34]. Los resultados mostrados en [34] son similares a aquellos encontrados en otras ciudades que no utilizan mezclas de etanol-gasolina [35]. Por tanto la producción de sustancias tóxicas no disminuye con el uso de mezclas E10, aunque las investigaciones en este tópico son muy pocas.

En Estados Unidos, las gasolinas oxigenadas se introdujeron como un mecanismo para combatir las emisiones de CO (durante el invierno) y de ozono (durante el verano) [36]. Un estudio

llevado a cabo en la ciudad de Denver mostró que los niveles de formaldehído se incrementaron significativamente cuando el contenido de etanol en la gasolina subió del 2 al 2,6% en peso [37]. Adicionalmente, un estudio de la Agencia Norteamericana de Protección Ambiental para analizar niveles altos de concentración de ozono demostró que estos excedieron los valores regulados en un 78-119% en distritos que usan combustible E10, mientras que en distritos que usan gasolina pura los niveles se excedieron sólo en un 33-53% [38, 39].

Tabla 1 Concentraciones en el aire atmosférico y niveles de riesgo carcinogénico por inhalación, para aldehídos resultantes de la adición del etanol a la gasolina [32]

Probabilidad o nivel de riesgo	Acetaldehído		Formaldehído	
	mg/m³	p. p. b.	mg/m³	p. p. b.
E-4 (1 en 10.000 personas)	5,00 E-02	2,75 E-05	8,00 E-03	5,32 E-03
E-5 (1 en 100.000 personas)	5,00 E-03	2,75 E-06	8,00 E-04	5,32 E-04
E-6 (1 en 1.000.000 personas)	5,00 E-04	2,75 E-07	8,00 E-05	5,32 E-05

Algunos autores han observado incrementos en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) con gasolinas oxigenadas comparados con las gasolinas puras [18, 27, 38-40]. Note que los NO_x son precursores claves en la formación de ozono troposférico y por lo tanto de *smog* fotoquímico [38]. También, las emisiones de NO_x están fuertemente correlacionadas con la relación aire/combustible [16], por lo que se requiere una optimización en el funcionamiento de los motores para trabajar con mezclas E10, para mantener bajos niveles de emisión de NO_x [18]. Un estudio en Australia mostró un incremento en las emisiones de NO_x de un 5% para vehículos de modelos posteriores a 1986. De hecho, en Australia se ha estimado que retirar los vehículos de modelos anteriores a 1986 produce más reducción de la contaminación que el uso del combustible E10 [41].

De otro lado, el uso de convertidores catalíticos en los motores de los vehículos es usualmente más eficiente en la reducción de contaminantes atmosféricos que la composición misma del combustible. Tanto el etanol como el acetaldehído son sustancias muy resistentes al ataque catalítico de los convertidores [17, 19]. Pero tal vez el mayor problema asociado a la contaminación atmosférica por uso de mezclas etanol-gasolina radica en las pérdidas por evaporación [42]. Las gasolinas adicionadas con bajas concentraciones de etanol tienen presiones de vapor de Reid (PVR) mayores que las gasolinas puras [19, 41, 43]. Así, el efecto de las pérdidas por evaporación puede ser muy significativo cuando se superan los 16 °C [41], lo que puede ser perjudicial en ciudades calientes, como Santiago de Cali. Varios autores han demostrado que si se tienen en cuenta las pérdidas

por evaporación, las gasolinas E10 producen mayores emisiones de hidrocarburos totales, especies orgánicas no-metánicas y sustancias tóxicas que las gasolinas puras [36, 44, 45]. Lo anterior incrementa sustancialmente el potencial de formación de ozono troposférico [46].

De acuerdo con los estudios llevados a cabo en otros países, parece que el combustible E10 puede presentar algunas ventajas como la reducción de material particulado, emisiones de CO, hidrocarburos totales y sustancias tóxicas (como el benceno) con un apropiado control de la PVR. Sin embargo, con deficientes controles de la PVR y debido al uso de E10 en ciudades con altas temperaturas medias todos los días del año, se pueden esperar altas pérdidas evaporativas, incrementando los niveles actuales de contaminación por hidrocarburos totales, dióxido de carbono y sustancias tóxicas. Aun con control de la PVR, la mezcla E10 causa mayores emisiones de acetaldehído, NO_x y etanol, que contribuyen activamente en la potencial formación de ozono troposférico [47].

La inclusión de la política del etanol en Colombia debería realizarse con precaución. En países como Brasil, Estados Unidos y Australia, algunos estudios sobre los riesgos hacia la salud y el impacto en la generación de *smog* fotoquímico producidos por el uso de mezclas etanol-gasolina muestran resultados preocupantes. Además a nivel nacional, hay muy pocos trabajos sobre la contaminación por ozono [48], no hay programas de monitoreo de sustancias tóxicas en el aire urbano de las grandes ciudades [49], por lo que los impactos a largo plazo pueden ser perjudiciales para la salud de la población.

Efectos del alcohol carburante en la contaminación de las aguas

La protección de las aguas subterráneas es fundamental para garantizar el recurso hídrico, tanto para nuestra sociedad actual como para las futuras generaciones. Hoy, las aguas subterráneas se presentan como fuentes básicas de abastecimiento dados los actuales episodios de sequías que se es-

tán experimentando en muchas partes del mundo. Colombia no es ajena a esta problemática. En este contexto, muchos estudios indican que la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas debido a las mezclas E10 es mayor que la contaminación esperada por gasolinas puras [50, 51]. Existen varias razones para esperar el incremento en los niveles de contaminación [52, 53].

La adición de etanol a la gasolina afecta algunas propiedades primarias que gobiernan la infiltración, redistribución y disolución de la gasolina hacia los suelos y aguas subterráneas en caso de derrames accidentales o provocados. La naturaleza hidrofílica del etanol causa su casi absoluta partición hacia la fase acuosa en el entorno. Como la concentración de etanol en fase acuosa crece, la solubilidad de los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos) también se incrementa, por el fenómeno de cosolvencia [43, 54-56]. Así, es posible que altas concentraciones de etanol acuoso faciliten la transferencia de hidrocarburos hacia la fase acuosa, incrementando la concentración de contaminantes en las aguas subterráneas [57, 58].

La mayoría de los resultados indican que la cosolvencia es significativa en concentraciones de etanol mayores del 10% en volumen [59]. Pero la cosolvencia puede también ser crítica en casos de grandes derrames de gasohol o en emisiones simultáneas de alcohol puro con otros combustibles [60, 61]. De esta manera, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), usualmente presentes en fase acuosa en concentraciones muy bajas en derrames de gasolinas puras dada su inherente hidrofobicidad, podrían disolverse por la presencia del etanol y aparecer en concentraciones preocupantes en los acuíferos.

Por otra parte, la adición de etanol a la gasolina produce reducciones significativas en las tensiones superficiales e interfaciales del combustible modificado [53], las cuales facilitan la difusión a través de pequeños poros e infiltración a través de la zona vadosa hacia los depósitos de agua subterránea de la fase líquida no-acuosa de la gasolina (en la que se encuentran los compuestos más

tóxicos). Sin embargo, los estudios realizados hasta la fecha sobre los aspectos dinámicos de la difusión de gasohol y su infiltración a través de la zona no saturada son muy limitados, por lo que se requiere más investigación en este tema.

Algunos estudios reportan que la mezcla E10 incrementa la solubilidad de los BTEX desde 30 hasta 210% [56]. Este efecto sólo es importante en las etapas iniciales de los derrames de combustible, antes del fraccionamiento del etanol. Pero, también existe la posibilidad de que se produzcan derrames de etanol o de E10 que encuentren fases líquidas no acuosas enterradas (y estáticas) que pueden removerse y continuar su peligroso flujo hacia los acuíferos [60].

También se ha mostrado que el etanol inhibe la biodegradación de los contaminantes, especialmente de BTEX, por degradación preferencial del etanol, causando consumo preferencial de aceptores de electrones y nutrientes, y cambios en las poblaciones microbiológicas en favor de agentes que degraden el alcohol [51, 62]. La demanda biológica de oxígeno del alcohol también aumenta las condiciones reductoras, las cuales se pueden convertir en anaeróbicas y metanogénicas [51]. Estos efectos disminuyen la capacidad de atenuación natural o de autorrestauración del medio ambiente. El efecto neto es un incremento en la longitud de la pluma de los contaminantes disueltos en aguas subterráneas [36]. Por ejemplo, para un período de veinte años un estudio estimó que la pluma de benceno disuelto puede llegar a estar entre un 7 y un 150% mayor debido a la presencia de etanol en la mezcla E10 comparado con la pluma en presencia de gasolina pura [62, 63]. En Estados Unidos, un estudio cuantificó la longitud de la pluma de benceno en dos suelos contaminados: uno con gasolina pura (en Iowa) y otro con mezcla E10 (en Kansas). Para el primer sitio la longitud promedio de la pluma fue de 59 ± 41 m mientras que para el segundo esta fue de 80 ± 31 m, mostrando un incremento del 36% [64].

De acuerdo con lo enunciado en los párrafos anteriores, el panorama de los riesgos hacia la

salud de las personas por la implementación del programa de gasolinas oxigenadas con alcohol involucraría no sólo aquellos riesgos generados por la presencia de sustancias tóxicas en el aire (y que llegan a los seres vivos por inhalación), sino también aquellos riesgos producidos por la presencia de sustancias tóxicas en las aguas debido a la facilidad de los componentes de las mezclas E10 de difundirse y disolverse a través de las capas de suelo y de las corrientes de agua, llegando finalmente a los seres vivos principalmente por vía oral.

¿Es sostenible el alcohol carburante?

La mezcla E10 es más eficiente desde el punto de vista mecánico que la gasolina pura porque el índice de octanos se incrementa por la presencia del alcohol [65], aunque el contenido energético del etanol es más bajo. El efecto neto consiste en un pequeño aumento en el consumo de combustible y un poco más de emisiones de dióxido de carbono [66]. Pero en la evaluación de la posible contribución del alcohol carburante al cambio climático debe tenerse en cuenta un análisis económico y energético que involucre todos los pasos del ciclo de vida de este producto, desde su cuna hasta su tumba, teniendo en cuenta las actuales directivas mundiales en cuanto al mercado de CO₂ [7].

Diferentes estudios sobre los costos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la manera más eficiente demuestran que los objetivos del protocolo de Kyoto se pueden alcanzar con valores del orden de 30 €/ton de CO₂ [7, 67]. La sustitución de gasolina con etanol en la mezcla E10 se justifica si se cumplen dos premisas: primera, que el uso de bioetanol produzca ahorros significativos de fuentes de energía no renovables y una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Segunda, que los costos de hacer las reducciones de los gases de efecto invernadero como resultado del uso de bioetanol no sean mayores que los costos de procesos alternativos; esto significa que los cos-

tos de sustituir etanol en cantidades necesarias para evitar una tonelada de CO₂ no deberían ser mayores que 30 € [7].

Los costos de reducción de gases de efecto invernadero mostrados en la tabla 2, expresan que la alternativa de usar E10 en políticas de reducción en gases de efecto invernadero es mucho menos atractiva que otras tecnologías, como el secuestro de carbono en bosques, aun para un mercado maduro como el brasilero [5]. Lo que parece estar claro es que la producción

de alcohol carburante a partir de caña de azúcar en Latinoamérica sí podría ser sostenible (con costos por debajo del límite de 30 €/t), debido a los bajos costos operativos en el continente [68]. Las estimaciones indican que las reducciones de gases de efecto invernadero con E10 están en el rango 1-5% [41]. Se trata entonces de reconocer si estas reducciones son justificadas desde el punto de vista económico y ambiental, a través de análisis cuantitativos costo-beneficio de esta política.

Tabla 2 Costos globales de alternativas de reducción de gases de efecto invernadero y valores comerciales para la reducción de 1 t de CO₂

<i>Detalle</i>	<i>Valor (€)</i>		<i>Referencia</i>
	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	
Costo de reducción en Australia con E10 (bioetanol)	157,7	164,5	[41]
Costo de reducción en Brasil con E10 (bioetanol)	45,8	45,8	[33]
Costo de reducción por secuestro de carbono en bosques	8,6	128,0	[69]
Valor comercial en Australia	5,9	29,7	[70]
Valor comercial en Reino Unido	6,9	6,9	[71]
Valor comercial de acuerdo con el protocolo de Kyoto	30,0	30,0	[7]

La figura 2 muestra la relación entre reducciones de CO₂ por hectárea, el costo de bioetanol y los costos de reducción de emisiones de CO₂. Los valores fueron tomados de quince estudios para cultivos de trigo y remolacha [7]. En las ordenadas se muestran las posibles reducciones de CO₂ en kilogramos por hectárea de tierra cultivada (*R*), en las abcisas se muestran los costos adicionales resultantes de la sustitución de gasolina tradicional con bioetanol (*S*). Las líneas rectas corresponden a los costos de reducción por tonelada de CO₂ (*CR*). Estas se calculan mediante $CR = S/R$. Para que una materia prima y por tanto el etanol producido a partir de ella conduzcan a un proceso sostenible, de acuerdo con los preceptos del protocolo de Kyoto, se deben obtener valores dentro del área que está a la izquierda de la recta de 30 €/t (área en el gráfico de color gris oscuro). Materias primas como la remolacha y el trigo están lejos de

esta área como se puede apreciar en la figura 2. Se requiere un estudio para evaluar la posición de “sostenibilidad” de la caña de azúcar en el entorno colombiano.

Es claro que el mercado del etanol no es económicamente sostenible en ningún país del mundo, por lo cual debe ser soportado por subvenciones [5, 33, 41, 72]. Por ejemplo, a finales de los 90, los ciudadanos brasileros pagaron US\$2 billones/año para subsidiar la producción de alcohol carburante [33]. Otro estudio estimó en US\$100 millones/año la transferencia de subsidios “no declarada” hacia los productores de caña de azúcar [73]. Petrobras, la compañía brasilera de combustibles, pone un sobre costo de US\$0,14/L por litro de gasolina vendida para ayudar al mercado del alcohol. Debido a estas subvenciones, pagadas a los productores de alcohol, y al fluctuante mercado internacional

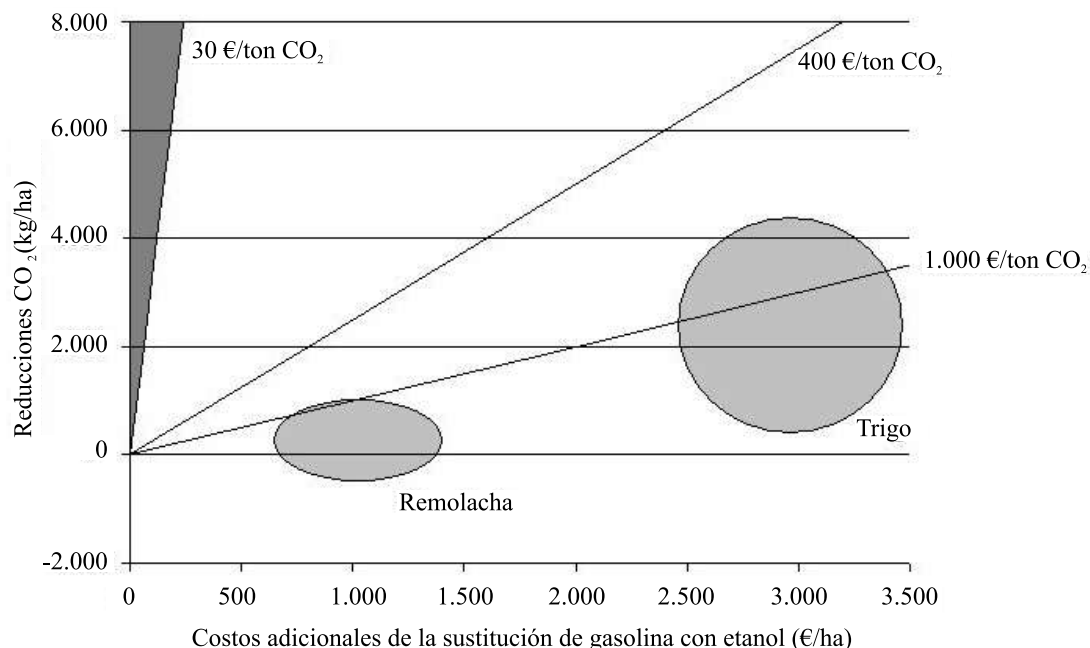


Figura 2 Reducciones de CO₂ versus costos resultantes de la sustitución de gasolina con etanol para algunas materias primas [7]

de la gasolina, Petrobras reportó un déficit por US\$4 billones a finales de los 90 [33]. Hoy en día, la continuidad del programa de alcohol en Brasil está en entredicho, por lo que la alternativa de vender etanol carburante a países industrializados, como un mecanismo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, es ampliamente discutida [33, 74].

La producción de alcohol carburante en Estados Unidos y en Australia es controlada por pocos productores, que a su vez gozan de estrategias monopolizadoras que los protegen contra importaciones. Esto conduce a ineficiencias que a la postre deben ser pagadas por los consumidores [5, 75]. En Estados Unidos sólo cuatro firmas controlan el 95% del suministro de alcohol carburante [39]. El Gobierno colombiano ha estimado que los recaudos por motivo de las exenciones a la porción de alcohol (10%) mezclada con la gasolina corriente, disminuirán en US\$98,1 millones al año [76], dinero que deberá ser asumido por los ciudadanos.

En el análisis del ciclo de vida, el contenido energético neto de una sustancia es igual al poder calorífico del combustible menos la energía utilizada para su producción y transporte [77]; esta última corresponde a la energía no-renovable empleada [78]. Algunos estudios muestran que el bajo poder calorífico del etanol (21 MJ/L), afecta el contenido energético neto. El contenido energético neto es negativo cuando la energía no-renovable empleada en la producción y transporte es mayor que la energía producida por la combustión del etanol. Contenidos energéticos netos entre -10 y -6 MJ/L para etanol a partir de trigo, y entre -10 y 5 MJ/L para etanol a partir de remolacha se presentan en la literatura [7]. Para etanol a partir de maíz se han determinado valores entre 3,6 y 10 MJ/L [78, 79]. Un gran debate han producido las estimaciones del contenido energético neto del bioetanol [5, 7].

En adición, el contenido energético neto del E10 se puede ver afectado por la debilidad en las es-

trategias nacionales y regionales para el control de la calidad de los combustibles en las estaciones de servicio. Las gasolinas adicionadas con etanol se pueden adulterar con compuestos miscibles en gasolina, como kerosene, aceite diésel o algunos refinados, de menor costo [80]. Para el futuro cercano, se podría anticipar la tentación de algunos minoristas inescrupulosos por adicionar adulterantes a la mezcla E10, quienes asignarán la disminución en la eficiencia energética de la combustión a la presencia del alcohol.

Finalmente, en el Valle del Cauca no se espera un impacto significativo en cuanto a generación de empleo, dado que la operación de las destilerías se realiza con muy poco personal. Las destilerías de los ingenios del Cauca y Mayagüez sólo generarán 40 y 30 empleos directos, respectivamente [81]. Además, la materia prima que se utilizará para la producción del alcohol corresponde en gran parte a aquella que se ha utilizado normalmente en la producción de azúcar de exportación [82], por lo que no se sembrará caña adicional y el empleo en el campo no percibirá ningún incremento.

Conclusiones

De acuerdo con la revisión que se ha hecho a la literatura científica, se presentan desventajas significativas por la adición de etanol a la gasolina en un porcentaje volumétrico del 10%. Estas son:

1. Las reducciones de gases de efecto invernadero son muy bajas (máximo 4%).
2. Las emisiones de algunas sustancias cancerígenas se incrementan.
3. Las pérdidas evaporativas aumentarían y con ello los niveles de sustancias contaminantes.
4. Hay evidencia de que el potencial de producción de ozono troposférico puede incrementar.
5. La contaminación de aguas subterráneas puede verse favorecida por fenómenos de cosolencia y de reducción de las tensiones superficiales durante derrames accidentales o provocados.
6. El etanol requiere subsidios de los gobiernos en todo el mundo.

7. El etanol de fuentes agrícolas presenta un contenido energético neto bajo.
8. A nivel regional esta tecnología no persigue la generación significativa de empleo en el Valle del Cauca.

Estas desventajas podrían afectar el medio ambiente, la salud y la economía de los consumidores en el mediano y largo plazo, por tanto deberían tenerse en cuenta en las políticas nacionales sobre sostenibilidad con el propósito de mitigar estos impactos. La comunidad científica nacional debe motivarse urgentemente hacia la ejecución de proyectos de investigación que respondan a las actuales falencias en el entendimiento de los impactos ambientales, económicos y sociales de la adición de etanol a la gasolina. Estos estudios deben ser conducidos por instituciones ajenas a cualquier beneficio comercial del negocio del alcohol carburante.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo del Programa Alban, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina, beca número E04D028890CO.

Referencias

1. "Ley 693 de 2001". *Congreso de la República de Colombia*. En: <http://www.secretariassenado.gov.co/leyes/L0693001.HTM>. Consultada el 21 de octubre de 2005.
2. Federación Nacional de Biocombustibles. *El alcohol carburante, una alternativa inmediata como combustible para Colombia*. En: <http://www.fedebiocombustibles.com/alternativa.htm>. Consultada el 23 de octubre de 2005.
3. "Arranca el automóvil limpio en Colombia". *Diario el País*, 30 de octubre de 2005. En: <http://elpais-cali.terra.com.co/paionline/notas/Octubre302005/A1530N1.html>. Consultada el 30 de octubre de 2005.
4. Ecopetrol. "Llega la ola verde". *Carta Petrolera*, número 111 (mayo-junio de 2005). En: http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera2005/portada.htm. Consultada el 29 de octubre de 2005.
5. R. K. Niven. "Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article". *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Vol. 9, 2005. pp. 535-555.
6. G. Z. Fu, A. W. Chan, D. E. Minns. "Life cycle assessment of bio-ethanol derived from cellulose". *Interna-*

- tional Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 8. 2003. pp. 137-141.
7. J. M. Henke, G. Klepper, N. Schmitz. "Tax exemption for biofuels in Germany: Is bio-ethanol really an option for climate policy?" *Energy*. Vol. 30. 2005. pp. 2617-2635.
8. P. R. D. Williams. "Data available for evaluating the risks and benefits of MTBE and ethanol as alternative fuel oxygenates". *Risk Analysis*. Vol. 23. 2003. pp. 1085-1115.
9. T. Reichhardt, "Fuel additives put under scrutiny – again". *Nature*. Vol. 397. 1999. pp. 96-97.
10. M. Peplow, "Alcohol fuels not so green". News@Nature (27 de junio de 2005) News. 2005.
11. S. Kim, B. E. Dale. "Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bio-ethanol and bioDiesel". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 29. 2005. pp. 426-439.
12. B. Wahlund, J. Yan, M. Westermarck. "Increasing biomass utilization in energy systems: A comparative study of CO₂ reduction and cost for different bioenergy processing options". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 26. 2004. pp. 531-544.
13. F. Manzini, "Inserting renewable fuels and technologies for transport in Mexico City Metropolitan Area". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 31. 2006. pp. 327-335.
14. C.-H. Wang, S.-S. Lin, H.-L. Chang "Effect of oxygenates on exhaust emissions from two-stroke motorcycles". *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. Vol. 37. 2002. pp. 1677-1685.
15. C. N. Hamelinck, A. P. C. Faaij. "Outlook for advanced biofuels". *Energy Policy* (en prensa, doi:10.1016/j.enpol.2005.06.012).
16. B. Q. He, H. X. Wang, J. M. Hao, X. G. Yan, H. H. Xiao. "A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels". *Atmospheric Environment*. Vol. 37. 2003. pp. 949-957.
17. S. T. Leong, S. Muttamara, P. Laortanakul. "Applicability of gasoline containing ethanol as Thailand's alternative fuel to curb toxic VOC pollutants from automobile emission". *Atmospheric Environment*. Vol. 36. 2002. pp. 3495-3503.
18. W. D. Hsieh, R. H. Chen, T. L. Wu, T. H. Lin. "Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels". *Atmospheric Environment*. Vol. 36. 2002. pp. 403-410.
19. S. G. Pouloupoulos, D. P. Samaras, C. J. Philippopoulos. "Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels". *Atmospheric Environment*. Vol. 35. 2001. pp. 4399-4406.
20. L. W. Jia, M. Q. Shen, J. Wang, M. Q. Lin. "Influence of ethanol-gasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine". *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 123. 2005. pp. 29-34.
21. S. M. Correa, E. M. Martins, G. Arbilla. "Formaldehyde and acetaldehyde in a high traffic street of Rio de Janeiro, Brazil". *Atmospheric Environment*. Vol. 37. 2003. pp. 23-29.
22. D. D. A. Azevedo, C. Y. M. Dos Santos, F. R. De Aquino Neto. "Identification and seasonal variation of atmospheric organic pollutants in Campos dos Goytacazes, Brazil". *Atmospheric Environment*. Vol. 36. 2002. pp. 2383-2395.
23. E. Grosjean, D. Grosjean, L. F. Woodhouse, Y. J. Yang. "Peroxyacetyl nitrate and peroxypropionyl nitrate in Porto Alegre, Brazil". *Atmospheric Environment*. Vol. 36. 2002. pp. 2405-2419.
24. D. Grosjean, E. Grosjean, L. F. R. Moreira. "Speciated ambient carbonyls in Rio de Janeiro, Brazil". *Environmental Science & Technology*. Vol. 36. 2002. pp. 1389-1395.
25. F. E. Ahmed "Toxicology and human health effects following exposure to oxygenated or reformulated gasoline". *Toxicology Letters*. Vol. 123. 2001. pp. 89-113.
26. R. Magnusson, C. Nilsson, B. Andersson. "Emissions of aldehydes and ketones from a two-stroke engine using ethanol and ethanol-blended gasoline as fuel". *Environmental Science & Technology*. Vol. 36. 2002. pp. 1656-1664.
27. K. T. Knapp, F. D. Stump, S. B. Tejada. "The effect of ethanol fuel on the emissions of vehicles over a wide range of temperatures". *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 48. 1998. pp. 646-653.
28. F. D. Stump, K. T. Knapp, W. D. Ray. "Influence of ethanol-blended fuels on the emissions from three pre-1985 light-duty passenger vehicles". *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 46. 1996. pp. 1149-1161.
29. E. Zervas, X. Montagne, J. Lahaye. "The influence of gasoline formulation on specific pollutant emissions". *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 49. 1999. pp. 1304-1314.
30. S. G. Pouloupoulos, C. J. Philippopoulos. "The effect of adding oxygenated compounds to gasoline on automotive exhaust emissions". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. Vol. 125. 2003. pp. 344-350.
31. E. M. Martins, G. Arbilla. "Computer modeling study of ethanol and aldehyde reactivities in Rio de Janeiro

- urban air". *Atmospheric Environment*. Vol. 37. 2003. pp. 1715-1722.
32. EPA, Integrated Risk Information System. En: <http://www.epa.gov/iris/subst/index.html>. Consulta el 28 de octubre de 2005.
33. J. R. Moreira, J. Goldemberg. "The alcohol program". *Energy Policy*. Vol. 27. 1999. pp. 229-245.
34. J. V. de Assuncao, U. R. Pesquero, R. E. Bruns, L. R. F. Carvalho. "Dioxins and furans in the atmosphere of São Paulo City, Brazil". *Chemosphere*. Vol. 58. 2005. pp. 1391-1398.
35. M., Schuhmacher, J. L. Domingo. "Long-term study of environmental levels of dioxins and furans in the vicinity of a municipal solid waste incinerator". *Environment International*. Vol. 32. 2006. pp. 397-404.
36. Lawrence Livermore National Laboratory. "Health and environmental assessment of the use of ethanol as a fuel oxygenate". Report to the California Environmental Policy Council in Response to Executive Order D-5-99, Sacramento, CA, UCRL-AR-135949, Vol. 3-5; 1999.
37. L. G. Anderson, J. A. Lanning, R. Barrell, J. Miyagishima, R. H. Jones, P. Wolfe. "Sources and sinks of formaldehyde and acetaldehyde: An analysis of Denver's ambient concentration data". *Atmospheric Environment*. Vol. 30. 1996. pp. 2113-2123.
38. C. Hodge, "Comment: More evidence mounts for banning, not expanding, use of ethanol in US gasoline". *Oil and Gas Journal*. Vol. 101. 2003. pp. 18-20.
39. C. Hodge, "Ethanol use in US gasoline should be banned, not expanded". *Oil & Gas Journal*. Vol. 100. 2002. pp. 20-30.
40. H. Bayraktar, "Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines". *Renewable Energy*. Vol. 30. 2005. pp. 1733-1747.
41. CSIRO/BTRE/ABARE. 2003. "Appropriateness of a 350 Million Litre biofuels target". Department of Industry, Tourism and Resources, Canberra. En: http://www.btre.gov.au/docs/joint_reports/biofuels/BiofuelsStudy.pdf. Consultada el 19 de octubre de 2005.
42. R. Aulich, X. M. He, A. A. Grisanti, C. L. Knudson. "Gasoline evaporation-ethanol and nonethanol blends". *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 44. 1994. pp. 1004-1009.
43. R. French, P. Malone. "Phase equilibria of ethanol fuel blends". *Fluid Phase Equilibria*. Vol. 228. 2005. pp. 27-40.
44. Commission on Geosciences, Environment and Resources, National Research Council. "Ozone-forming potential of reformulated gasoline". Washington D. C. 1999.
45. H. L., MacLean, L. B. Lave. "Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies". *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 29. 2003. pp. 1-69.
46. California Air Resources Board, Resolution 98-78, Sacramento, CA (1998) 11 Dec. En: <http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/ethanol/res9878.pdf>. Consultada el 20 de octubre de 2005.
47. M. F. Andrade, R. Y. Ynoue, R. Harley, A. H. Miguel. "Air quality model simulating photochemical formation of pollutants: the Sao Paulo Metropolitan Area, Brazil". *International Journal of Environment and Pollution*. Vol. 22. 2004. pp. 460-475.
48. M. Jaramillo, M. Núñez, W. Ocampo, D. Pérez, G. Portilla. "Modelación fotoquímica del ozono en Cali-Yumbo". en VIII Congreso La Investigación en la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 20-23 de septiembre de 2005.
49. M. Jaramillo, M. Núñez, W. Ocampo, D. Pérez, G. Portilla. "Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona de Cali-Yumbo". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. Vol. 31. 2004. pp. 38-48.
50. T. Shih, Y. Rong, T. Harmon, M. Suffet. "Evaluation of the Impact of Fuel Hydrocarbons and Oxygenates on Groundwater Resources". *Environmental Science and Technology*. Vol. 38. 2004. pp. 42-48.
51. M. L. B. Da Silva, P. J. J. Álvarez. "Effects of ethanol versus MTBE on benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene natural attenuation in aquifer columns". *Journal of Environmental Engineering-Asce*. Vol. 128. 2002. pp. 862-867.
52. S. E. Powers, C. S. Hunt, S. E. Heermann, H. X. Corseuil, D. Rice, P. J. J. Alvarez. "The transport and fate of ethanol and BTEX in groundwater contaminated by gasohol". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. Vol. 31. 2001. pp. 79-123.
53. C. J. McDowell, S. E. Powers. "Mechanisms affecting the infiltration and distribution of ethanol-blended gasoline in the vadose zone". *Environmental Science and Technology*. Vol. 37. 2003. pp. 1803-1810.
54. C. S. Chen, P. S. C. Rao, J. J. Delfino. "Oxygenated fuel induced cosolvent effects on the dissolution of polynuclear aromatic hydrocarbons from contaminated soil". *Chemosphere*. 2005. pp. 1572-1582.
55. T. Lanzer, O. F. von Meien, C. I. Yamamoto. "A predictive thermodynamic model for the Brazilian gasoline". *Fuel*. Vol. 84. 2005. pp. 1099-1104.
56. H. X. Corseuil, B. I. A. Kaipper, M. Fernandes. "Cosolvency effect in subsurface systems contaminated with petroleum hydrocarbons and ethanol". *Water Research*. Vol. 38. 2004. pp. 1449-1456.

57. S. E. Heermann, S. E. Powers. "Modeling the partitioning of BTEX in water-reformulated gasoline systems containing ethanol". *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol. 34. 1998. pp. 315-341.
58. S. B. F. Reckhorn, L. V. Zuquette, P. Grathwohl. "Experimental investigations of oxygenated gasoline dissolution". *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 127. 2001. pp. 208-216.
59. H. Haskew and Associates, Inc. 2001. "Emission effects (permeation) of ethanol in gasoline". En: <http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/meeting/2001/053101Pmtn.pdf>. Consultada el 19 de octubre de 2005.
60. C. J. McDowell, S. E. Powers, T. Buscheck. "Behavior of Gasoline Pools Following a Denatured Ethanol SIPI". *Ground Water*. Vol. 41. 2003. pp. 746-757.
61. N. Dakhel, G. Pasteris, D. Werner, P. Hohener. "Small-volume releases of gasoline in the vadose zone: Impact of the additives MTBE and ethanol on groundwater quality". *Environmental Science and Technology*. Vol. 37. 2003. pp. 2127-2133.
62. R. A. Deeb, J. O. Sharp, A. Stocking, S. McDonald, K. A. West, M. Laugier, P. J. J. Alvarez, M. C. Kavanaugh, L. Alvarez-Cohen. "Impact of ethanol on benzene plume lengths: Microbial and modeling studies". *Journal of Environmental Engineering-Asce*. Vol. 128. 2002. pp. 868-875.
63. J. W. Molson, J. Barker, M. Schirmer. "Modeling the impact of ethanol on the persistence of BTEX compounds in gasoline-contaminated groundwater". Report for the California MTBE Research Partnership, NWRI-00-01, Center for Groundwater Restoration and Protection, National Water Research Institute, California. 2000.
64. G. M. L. Ruiz-Aguilar, K. T. O'Reilly, P. J. J. Álvarez. "A comparison of benzene and toluene plume lengths for sites contaminated with regular vs. ethanol-amended gasolina". *Ground Water Monitoring and Remediation*. Vol. 23. 2003. pp. 48-53.
65. R. da Silva, R. Cataluna, E. W. de Menezes, D. Samios, C. M. S. Piatnicki. "Effect of additives on the antiknock properties and Reid vapor pressure of gasoline". *Fuel*. Vol. 84. 2005. pp. 951-959.
66. A. Al-Hasan, "Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission". *Energy Conversion and Management*. Vol. 44. 2003. pp. 1547-1561.
67. European Commission, "Green paper on greenhouse gas emissions trading within the European Union". COM (2000)87, Brussels (2000).
68. Comunicación personal con J. M. Henke, Kiel Institute for world economics, en noviembre de 2005.
69. K. R. Richards, C. Stokes. "A review of forest carbon sequestration cost studies: A dozen years of research". *Climatic Change*. Vol. 63. 2004. pp. 1-48.
70. Australian Greenhouse Office. "National emissions trading: issuing the permits". Discussion Paper 2, Canberra; 1999. En: <http://www.greenhouse.gov.au/emissionstrading/papers/paper2/index.html>. Consultada el 29 de octubre de 2005.
71. E. Johnson, R. Heinen. "Carbon trading: time for industry involvement". *Environment International*. Vol. 30. 2004. pp. 279-288.
72. K. N. Rask, "Clean air and renewable fuels: the market for fuel ethanol in the US from 1984 to 1993". *Energy Economics*. Vol. 20. 1998. pp. 325-345.
73. T. G. Schmitz, A. Schmitz, J. L. Seale. "Brazil's ethanol program: The case of hidden sugar subsidies". *International Sugar Journal*. Vol. 105. 2003. pp. 254-265.
74. T. Koizumi, "The Brazilian ethanol programme: Impacts on world ethanol and sugar markets". *FAO Commodity and trade policy research working paper N.º 1*. 2003. En: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/006/ad430e/ad430e00.pdf>. Consultada el 28 de octubre de 2005.
75. N. Wilson, "Ethanol industry cannot compete", en The Australian 6 May. 2004. En: <http://www.information.com.au/news/04/05/article10131.asp>. Consultada el 27 de octubre de 2005.
76. Federación Nacional de Biocombustibles. "ABC de los alcoholes carburantes". En: http://www.aciem.org/bancoconocimiento/a/abcdelosalcoholescarburantesext/_ABCCARBURANTES.doc. Consultada el 30 de octubre de 2005.
77. K. L. Kadam, "Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India". *Energy Policy*. Vol. 30. 2002. pp. 371-384.
78. Kim, S. and B. E. Dale. "Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain: nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions". *Biomass & Bioenergy*. Vol. 28. 2005. pp. 475-489.
79. H. Shapouri, J. A. Duffield, M. Wang. "The energy balance of corn ethanol revisited". *Transactions of the Asae*. Vol. 46. 2003. pp. 959-968.
80. F. S. de Oliveira, S. G. Teixeira, M. C. U. Araujo, M. Korn. "Screening analysis to detect adulterations in Brazilian gasoline samples using distillation curves". *Fuel*. Vol. 83. 2004. pp. 917-923.
81. M. Romero, "En el valle geográfico del río Cauca son 5 los ingenios que se le midieron a construir destilerías". En *Diario el Tiempo*, 29 de octubre de 2005. http://el-tiempo.terra.com.co/economia/2005-10-30/ARTICULO-WEB-_NOTA_INTERIOR-2587787.html. Consultada el 29 de octubre de 2005.
82. "Etanol sustituirá 30% de exportaciones de azúcar". En: *Diario El País*, 18 de junio de 2003. <http://elpais-cali.terra.com.co/paionline/notas/Junio182003/B118N1.html>. Consultada el 29 de octubre de 2005.