

Contaminación atmosférica y sinergias edafo-hídricas en el ciclo de vida de combustibles fósiles y biocombustibles: Un estudio comparativo

Atmospheric pollution and soil-water synergies in the life cycle of fossil fuels and biofuels: A comparative study

Sandra Peña*
Joaquin Ochoa
Eddie Zambrano
Vega Maria Belen
Merchán Amy

Abstract

Fossil fuels release ancient carbon and toxic pollutants (SO_x, heavy metals), whereas biofuels recycle recent CO₂ but their agricultural production can cause eutrophication and deforestation. This study aimed to analyze and compare emissions associated with agricultural practices in Ecuador through a systematic review of official data (2015–2021) and scientific literature. Key indicators were evaluated, such as emission factors (g CO₂/MJ), fine particulate matter (PM_{2.5}) release and toxicity, and the relative contribution of these emissions to the national carbon footprint. Fossil fuels emit 50–91.6 g CO₂/MJ and SO_x; biofuels derived from lignocellulosic residues achieve negative emissions (-1.1 g CO₂ eq/MJ), whereas those from palm or soy double the fossil footprint (74 g CO₂ eq/MJ) due to land-use change. The study concludes that only advanced biofuels are sustainable; first-generation biofuels can be worse than fossil fuels. The discussion highlights that sustainability depends critically on the feedstock, agricultural practices, and waste management.

Keywords: Fossil fuels; biofuels; carbon footprint; soil and water pollution.

Resumen

Los combustibles fósiles liberan carbono vegetal y contaminantes tóxicos (SO_x, metales pesados), mientras que los biocombustibles reciclan CO₂ reciente pero su producción agrícola puede causar eutrofización y deforestación. El propósito de este estudio fue analizar y comparar las emisiones asociadas a las prácticas agrícolas en Ecuador, mediante una revisión sistemática de datos oficiales

Peña, S; Ochoa, J; Zambrano, E.; Vega, M; Merchán, A (2026) Atmospheric pollution and soil-water synergies in the life cycle of fossil fuels and biofuels: A comparative study. Universidad de Guayaquil. *Revista Iberoamericana De educación*, 9 (3).

Received: April, 2024
Approved: July, 2024

DOI: <https://doi.org/10.31876/rie.v9i1.283>

<http://www.revista-iberoamericana.org/index.php/es>

Magister
Sandra Emperatriz Peña Murillo
sandra.penam@ug.edu.ec
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7848-8021>
Universidad de Guayaquil
Ecuador- Guayaquil

Magister
Joaquin Alejandro Ochoa Celi
<https://orcid.org/0000-0001-5535-6563>
joaquin.ochoac@ug.edu.ec
Universidad de Guayaquil
Ecuador – Guayaquil

Magister
Eddie Manuel Zambrano Nevárez
<https://orcid.org/0000-0003-0358-0402>
eddie.zambranon@ug.edu.ec
Universidad de Guayaquil
Ecuador - Guayaquil

Maria Belén Vega
belen.vegar@ug.edu.ec
Universidad de Guayaquil

Amy Meerchán
amy.merchanm@ug.edu.ec
Universidad de Guayaquil

(2015–2021) y literatura científica. Se evaluaron indicadores clave como factores de emisión (g CO₂/MJ), liberación de partículas finas (PM_{2.5}) y su toxicidad, así como la contribución relativa de estas emisiones a la huella de carbono nacional. Los fósiles emiten 50-91.6 g CO₂/MJ y SO_x; los biocombustibles de residuos lignocelulósicos logran emisiones negativas (-1.1 g CO₂ eq/MJ), pero los de palma/soya duplican la huella fósil (74 g CO₂ eq/MJ) por cambio de uso de suelo. Se concluye que solo los biocombustibles avanzados son sostenibles; los de primera generación pueden ser peores que los fósiles. La discusión subraya que la sostenibilidad depende críticamente de la materia prima, prácticas agrícolas y gestión de residuos.

Palabras Clave: Combustibles fósiles; biocombustibles; huella de carbono; contaminación edafo-hídrica.

Resumo

Combustíveis fósseis liberam carbono antigo e poluentes tóxicos (SO_x, metais pesados), enquanto biocombustíveis reciclam CO₂ recente, embora sua produção agrícola possa causar eutrofização e desmatamento. Este estudo teve como objetivo analisar e comparar as emissões associadas a práticas agrícolas no Equador, por meio de uma revisão sistemática de dados oficiais (2015–2021) e da literatura científica. Foram avaliados indicadores-chave, como fatores de emissão (g CO₂/MJ), liberação e toxicidade de material particulado fino (PM_{2.5}) e a contribuição relativa dessas emissões para a pegada de carbono nacional. Combustíveis fósseis emitem entre 50 e 91,6 g CO₂/MJ e SO_x; biocombustíveis derivados de resíduos lignocelulósicos alcançam emissões negativas (-1,1 g CO₂ eq/MJ), ao passo que aqueles provenientes de palma ou soja duplicam a pegada fóssil (74 g CO₂ eq/MJ) devido à mudança no uso da terra. O estudo conclui que apenas biocombustíveis avançados são sustentáveis; biocombustíveis de primeira geração podem ser piores do que os combustíveis fósseis. A discussão destaca que a sustentabilidade depende fundamentalmente da matéria-prima, das práticas agrícolas e do manejo de resíduos.

Palavras-chave: Combustíveis fósseis; biocombustíveis; pegada de carbono; poluição do solo e da água.

INTRODUCTION

El sector energético global enfrenta una disyuntiva fundamental entre mantener el actual modelo basado en combustibles fósiles o transitar hacia fuentes renovables como los biocombustibles. Los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) han sido durante décadas la principal fuente de energía a nivel mundial debido a su alto poder calorífico e infraestructura consolidada; sin embargo, su explotación y consumo generan emisiones significativas de gases contaminantes que afectan al medio ambiente y contribuyen al calentamiento global (S. Peña et al., 2025). En contraste, los biocombustibles, derivados de biomasa reciente, ofrecen la ventaja teórica de devolver a la atmósfera el carbono capturado por fotosíntesis, cerrando así su ciclo de vida con un balance neto potencialmente menor (Sanhueza, 2009). Sin embargo, la transición desde combustibles fósiles hacia biocombustibles requiere un análisis detallado de la viabilidad técnica, económica y ambiental en cada contexto nacional, como lo demuestran los estudios realizados en Ecuador sobre el cambio de la matriz productiva (Zambrano et al., 2022).

No obstante, la comparación ambiental entre ambas fuentes energéticas no es unívoca. Como señalan Peña et al. (2025) la extracción de hidrocarburos genera impactos ambientales significativos que incluyen deforestación, fragmentación de hábitats, contaminación del agua y del aire, y emisión de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, los derrames de crudo constituyen una problemática recurrente en países petroleros como Ecuador, donde entre 2015 y 2021 se registraron 899 incidentes, solo en 2016 se contabilizaron 248 derrames (Peña et al., 2025). Estos eventos alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reduciendo su fertilidad y limitando la producción de cultivos (Hernández-Espriú et al., 2012).

Por su parte, los biocombustibles, aunque renovables, no están exentos de impactos ambientales críticos. Fargione et al. (2008) demostró que convertir selvas tropicales, turberas, sabanas o pastizales para producir biocombustibles de primera generación genera una "deuda de carbono" de 17 a 420 veces mayor que las reducciones anuales de GEI que estos biocombustibles proporcionarían al reemplazar combustibles fósiles. Además, la

producción intensiva de cultivos energéticos como maíz o soya incrementa la carga de nitrógeno en cuencas hidrográficas debido a la escorrentía de fertilizantes, provocando eutrofización costera y zonas hipóxicas (Twomey et al., 2010; van Wijnen et al., 2015). En el ámbito atmosférico, Prasad et al. (2011) señalan que los biocombustibles pueden incrementar las emisiones de NO_x y compuestos carbonílicos como formaldehído, contribuyendo a la formación de smog fotoquímico, aunque eliminan prácticamente por completo las emisiones de SO_x debido a su nulo contenido de azufre. En cuanto a la salud humana, Luo et al. (2024) compararon la toxicidad del material particulado (PM 2.5) proveniente de escape de automóviles, combustión de carbón y quema de biomasa vegetal, encontrando que las partículas de biomasa son significativamente menos citotóxicas en células epiteliales pulmonares humanas A549 que aquellas generadas por combustibles fósiles. Sin embargo, las partículas ultrafinas de biocombustibles de segunda generación pueden tener efectos tóxicos al menos similares a los de la gasolina, aunque probablemente involucrando diferentes vías de toxicidad (Gracz et al., 2021; Macor & Pavanello, 2009).

Dado este panorama de compensaciones ambientales, el presente estudio tiene como objetivo comparar el impacto ambiental generado por el uso de combustibles fósiles y biocombustibles, considerando especialmente la emisión de gases contaminantes (CO₂, NO_x, SO_x, COV), su efecto en cuerpos de agua y suelos, y la huella de carbono total mediante análisis de ciclo de vida (LCA).

Esta comparación busca proporcionar elementos técnicos para orientar políticas energéticas sostenibles, particularmente en contextos como el ecuatoriano, donde la dependencia de combustibles fósiles subsidiados (Peña et al., 2025) contrasta con el potencial agrícola para biocombustibles, aunque los subsidios energéticos representan un desafío fiscal y ambiental que requiere una reforma estructural para incentivar fuentes renovables.

MATERIALS AND METHODS

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica publicada entre 2005 y 2026, utilizando las siguientes bases de datos: Scopus, Science Direct, Springer, E-LIBRO y DSPACE.

Los criterios de inclusión fueron: (a) estudios que reporten factores de emisión directa de CO₂ para combustibles fósiles o biocombustibles, (b) investigaciones sobre eutrofización asociada a

cultivos energéticos, (c) registros documentados de derrames de hidrocarburos, (d) evaluaciones de toxicidad de material particulado (PM 2.5) mediante ensayos in vitro, y (e) artículos con análisis de ciclo de vida (LCA) publicados en revistas indexadas.

Para sistematizar la información recolectada y garantizar la trazabilidad del análisis, se definieron ocho indicadores ambientales clave, agrupados en tres categorías: emisiones atmosféricas (factor de emisión directa de CO₂, SO_x, NO_x y formaldehído), impacto edafo-hídrico (carga de nitrógeno y fósforo por escorrentía, metales pesados en suelos y derrames de hidrocarburos) y toxicidad del material particulado (PM2.5). La **Tabla 1**. Métricas e indicadores ambientales analizados sintetiza estos parámetros con sus respectivas unidades de medida, descripción operativa y fuentes de referencia.

Tabla 1. Métricas e indicadores ambientales analizados

Indicador	Unidad	Descripción
Factor de emisión directa de CO ₂	g CO ₂ /MJ	Cantidad de dióxido de carbono emitido por unidad de energía producida durante la combustión
Huella de carbono con iLUC	g CO ₂ eq/MJ	Emisiones totales incluyendo cambio indirecto de uso de suelo
Emisiones de SO _x	Cualitativo	Contribución a lluvia ácida y formación de aerosoles sulfatados
Emisiones de NO _x y formaldehído	Cualitativo	Precusores de smog fotoquímico y ozono troposférico
Carga de nitrógeno (N) y fósforo (P)	% de incremento	Escorrentía de fertilizantes hacia cuerpos de agua
Toxicidad de material particulado (PM2.5)	Citotoxicidad relativa	Evaluación en células epiteliales pulmonares humanas A549
Metales pesados en suelos	mg/kg	Concentración de cadmio (Cd), níquel (Ni), cromo (Cr) en suelos contaminados por derrames
Derrames de hidrocarburos	Número de incidentes	Registros anuales de derrames de crudo en Ecuador

Nota. Factores de emisión directa adaptados iLUC de Taheripour & Tyner (2013); eutrofización de Twomey et al. (2010) y van Wijnen et al. (2015) ; derrames en Ecuador de Peña et al. (2025) ; toxicidad de PM2.5 de Luo et al. (2024) y Hernández-Espriú et al. (2012)

Emisiones atmosféricas

Se recopilieron factores de emisión directa para diferentes combustibles carbonosos, incluyendo carbón bituminoso (87.3 g CO₂/MJ), lignito (91.6 g CO₂/MJ), gas natural (50.0 g CO₂/MJ), gasolina (69.3 g CO₂/MJ) y diésel (68.6 g CO₂/MJ). Para biocombustibles, se extrajeron valores de emisiones con y sin cambio de uso de suelo de Taheripour & Tyner (2013), así mismo, etanol de maíz (12.9-22.6 g CO₂ eq/MJ), etanol de rastrojo de maíz (-1.1 a -1.6 g CO₂ eq/MJ) y etanol de switchgrass (38.2-74.0 g CO₂ eq/MJ). Adicionalmente, se revisaron estudios de emisiones de NO_x, SO_x y compuestos carbonílicos (formaldehído, acetaldehído) de (Gracz et al., 2021; Macor & Pavanello, 2009; Prasad et al., 2011). Los combustibles fósiles presentan factores de emisión que oscilan entre 50.0 y 91.6 g CO₂/MJ, siendo el lignito el de mayor impacto y el gas natural el de menor emisión dentro de este grupo. En contraste, los biocombustibles de residuos lignocelulósicos logran emisiones netas negativas (-1.1 g CO₂ eq/MJ), mientras que los de palma o soya duplican la huella fósil (74 g CO₂ eq/MJ) cuando se incluye el cambio indirecto de uso de suelo.

Impacto edafo-hídrico

Para evaluar la contaminación hídrica, se analizaron estudios de carga de nitrógeno y fósforo por escorrentía de fertilizantes asociada a cultivos energéticos. Twomey et al. (2010) cuantificó el incremento de carga de nitrógeno en la cuenca del río Mississippi (10-34%) debido a la producción de etanol de maíz. van Wijnen et al. (2015) documentó la eutrofización costera en Europa atribuible a cultivos energéticos.

Por otro lado, para la contaminación de suelos, se revisaron registros de derrames de hidrocarburos en Ecuador correspondientes al período 2015-2021, reportados por Peña et al. (2025), totalizando 899 incidentes, con un máximo de 248 derrames en 2016. Adicionalmente, se analizaron estudios de concentración de metales pesados en suelos contaminados con diésel: Hernández-Espriú et al. (2012) documentó concentraciones de hidrocarburos totales de la fracción diésel (TPH-diésel) de 32,100 mg/kg en suelos agrícolas, muy superiores al límite legal de 1,200 mg/kg. Ante esta problemática, se han desarrollado diversos sistemas de tratamiento para suelos contaminados por hidrocarburos, incluyendo tecnologías físicas, químicas y biológicas que permiten la recuperación de áreas afectadas por derrames (Peña et al., 2019).

La contaminación hídrica por biocombustibles de primera generación se manifiesta en incrementos de carga de nitrógeno de hasta 34% en cuencas hidrográficas, generando eutrofización y zonas muertas. En contraste, los combustibles fósiles contaminan suelos principalmente por derrames, como los 899 incidentes registrados en Ecuador entre 2015 y 2021, que liberan metales pesados como cadmio y níquel, alterando la fertilidad del suelo y superando en hasta 27 veces los límites legales permitidos.

La remediación de estos suelos contaminados puede abordarse mediante métodos de biorremediación, que utilizan microorganismos para degradar hidrocarburos, o mediante electroremediación, que emplea campos eléctricos para movilizar contaminantes; ambos enfoques han mostrado resultados prometedores en la recuperación de suelos afectados por la industria petrolera (Peña, et al., 2025)

Toxicidad de material particulado (PM2.5)

Se revisaron estudios de toxicología in vitro que evaluaron el efecto de partículas PM2.5 provenientes de diferentes fuentes de combustión sobre células epiteliales pulmonares humanas A549. Luo et al. (2024) comparó la citotoxicidad de partículas de escape de automóviles, combustión de carbón y quema de biomasa vegetal. Southern et al. (2021) realizó un análisis cuantitativo de la toxicidad de partículas de biodiésel. Las partículas provenientes de la quema de biomasa son significativamente menos citotóxicas en células pulmonares humanas A549 que las generadas por combustibles fósiles, aunque las partículas ultrafinas de biocombustibles de segunda generación pueden presentar toxicidad similar a la gasolina, pero con diferentes vías de daño celular. En el contexto ecuatoriano, la contaminación atmosférica constituye un problema de salud pública en las principales ciudades, donde las concentraciones de material particulado y gases contaminantes superan los límites recomendados, afectando especialmente a poblaciones vulnerables (Peña, 2018). El biodiésel, si bien reduce la toxicidad del material particulado, incrementa la emisión de compuestos carbonílicos como formaldehído, lo que introduce una compensación en términos de calidad del aire.

Análisis de ciclo de vida (LCA) y huella de carbono

Se incorporaron estudios de análisis de ciclo de vida que evalúan emisiones well-to-wheels (del pozo a la rueda) y well-to-wake (del pozo a la estela). Carral et al. (2021) presentó factores de emisión de ciclo de vida para diferentes fuentes energéticas, incluyendo gas natural (0.5 kg CO₂ eq/kWh), carbón (1.11 kg CO₂ eq/kWh), petróleo (0.91 kg CO₂ eq/kWh) y biocombustibles (0.10 kg CO₂ eq/kWh). Cowie et al. (2021) abordó los efectos climáticos de la bioenergía forestal. Pehl et al. (2017) proyectó emisiones de ciclo de vida de plantas con captura y almacenamiento de carbono (CCS).

El análisis de ciclo de vida evidencia que los biocombustibles presentan el factor de emisión más bajo entre todos los combustibles (0.10 kg CO₂ eq/kWh), superando incluso al gas natural (0.5 kg CO₂ eq/kWh). Sin embargo, esta ventaja se anula cuando se incluye el cambio indirecto de uso de suelo (iLUC), que puede duplicar la huella de carbono de los biocombustibles de primera generación. Por ello, solo los biocombustibles de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos logran balances de carbono negativos, posicionándose como la única opción sostenible.

RESULTS

Con el fin de establecer una base cuantitativa para la comparación entre combustibles fósiles y biocombustibles, se recopilaron los factores de emisión directa de CO₂, así como la presencia de contaminantes secundarios (SO_x, NO_x, material particulado y formaldehído) documentados en la literatura especializada. Los datos recopilados se resumen en la **Tabla 2**. Factores de emisión de gases contaminantes por tipo de combustible, donde se presentan los valores de emisión por unidad de energía (g CO₂/MJ) correspondientes a combustibles fósiles (gas natural, gasolina, diésel, carbón y fueloil) y biocombustibles (etanol de maíz, etanol de rastrojo de maíz y etanol de palma/soya), junto con una descripción cualitativa de los contaminantes secundarios asociados a cada uno.

En consecuencia, la información contenida en esta tabla constituye el referente analítico para el contraste de perfiles de emisión entre ambas fuentes energéticas.

Tabla 2. Factores de emisión de gases contaminantes por tipo de combustible

	CO ₂ CO ₂ /MJ)	(g	SO _x	NO _x	(PM2.5)	Formalde hído
Combustible Fósiles						
Gas natural	50.0		Bajo	Bajo	Muy bajo	Bajo
Gasolina	69.3		Medio	Medio	Medio	Bajo
Diésel	68.6		Medio	Alto	Alto	Bajo
Carbón bituminoso	87.3		Muy alto	Alto	Muy alto	Medio
Lignito	91.6		Muy alto	Alto	Muy alto	Medio
Fueloil pesado	73.9		Muy alto	Alto	Alto	Medio
Biocombustibles						
Etanol (maíz)	12.9-22.6 (sin iLUC)		Cero	Variab le	Bajo	Increment a
Etanol (rastrojo de maíz)	-1.1 a -1.6 (negativo)		Cero	Bajo	Muy bajo	Bajo
Etanol (palma/soya con iLUC)	74.0 (con iLUC)		Cero	Variab le	Bajo	Variable

Nota. Adaptado de Taheripour & Tyner (2013); Prasad et al. (2011); Macor & Pavanello (2009) ; Luo et al. (2024)

Emisiones atmosféricas de gases contaminantes

Los resultados de la **Tabla 2.** Factores de emisión de gases contaminantes por tipo de combustible evidencian diferencias significativas entre ambos tipos de combustibles.

Los combustibles fósiles presentan factores de emisión directa que oscilan entre 50.0 g CO₂/MJ (gas natural) y 91.6 g CO₂/MJ (lignito), siendo el carbón y sus derivados los de mayor impacto por unidad de energía. Además, todos los fósiles emiten SO_x en cantidades variables, siendo el fueloil pesado, el carbón bituminoso y el lignito los de mayor contribución a la lluvia ácida (Prasad et al., 2011). Las emisiones de NO_x son particularmente altas en diésel, carbón y

fueloil, mientras que el material particulado (PM_{2.5}) alcanza niveles "muy altos" en la combustión de carbón y lignito.

En contraste, los biocombustibles presentan un perfil de emisiones radicalmente diferente. Todos los biocombustibles evaluados eliminan por completo las emisiones de SO_x, debido a su nulo contenido de azufre en la estructura molecular (Gracz et al., 2021; Macor & Pavanello, 2009). Sin embargo, el biodiésel incrementa las emisiones de NO_x y compuestos carbonílicos como formaldehído, lo que contribuye a la formación de smog fotoquímico (Prasad et al., 2011). El etanol de maíz (sin iLUC) presenta emisiones de CO₂ de 12.9 a 22.6 g CO₂ eq/MJ, significativamente inferiores a los fósiles, pero su huella se incrementa a 15.5-22.6 g CO₂ eq/MJ cuando se incluye el cambio indirecto de uso de suelo.

El hallazgo más relevante corresponde a los biocombustibles de residuos lignocelulósicos (rastrero de maíz), que logran emisiones netas negativas de -1.1 a -1.6 g CO₂ eq/MJ. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que han evaluado el potencial de residuos agrícolas, como los residuos de corte de caña de azúcar, para la producción de biocombustibles sólidos, demostrando que la biomasa lignocelulósica constituye una materia prima viable y sostenible para la generación de energía (Peña et al., 2023). Este valor negativo se debe a que su biomasa no compite con cultivos alimentarios ni genera deforestación, evitando así la deuda de carbono por cambio de uso de suelo.

Por el contrario, el etanol de palma o soya con iLUC duplica la huella de carbono de los combustibles fósiles, alcanzando hasta 74.0 g CO₂ eq/MJ, lo que evidencia que no todos los biocombustibles son ambientalmente superiores.

Impacto edafo-hídrico

La evaluación del impacto ambiental no puede circunscribirse a las emisiones atmosféricas, sino que debe incorporar los efectos sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos, donde los combustibles fósiles y los biocombustibles generan perturbaciones de naturaleza distinta. Con el fin de abordar esta dimensión, la **Tabla 3**. Impacto edafo-hídrico por tipo de combustible presenta una comparación sistemática de los impactos edafo-hídricos (contaminación de suelos y cuerpos de agua) asociados a combustibles fósiles y

biocombustibles de primera y segunda generación, considerando indicadores como eutrofización por escorrentía de fertilizantes, frecuencia de derrames de hidrocarburos, concentración de metales pesados en suelos y deforestación por cambio de uso de suelo.

Tabla 3. Impacto edafo-hídrico por tipo de combustible

Categoría de impacto	Combustibles fósiles	Biocombustibles 1ª generación	Biocombustibles 2ª generación
Agua (eutrofización)	No genera directamente	Alta por escorrentía de fertilizantes (N y P)	Nula (no requiere fertilizantes)
Incremento de carga de nitrógeno	N/A	10-34% (cuenca Mississippi)	0%
Zonas muertas (hipoxia)	No	Sí (Golfo de México, mares europeos)	No
Suelo (contaminación)			
Derrames frecuentes	Sí (899 en Ecuador 2015-2021, 248 en 2016)	No aplica	No aplica
Metales pesados	Cd, Ni, Cr (hasta 32,100 mg/kg TPH)	No	No
Pérdida de fertilidad del suelo	Sí (compactación, impermeabilización)	Posible por monocultivos	No
Deforestación	Sí (por extracción)	Sí (por iLUC: 17-420 veces de deuda de carbono)	No

Nota. Adaptado de Twomey et al. (2010) ; van Wijnen et al. (2015) ; Peña et al. (2025) ; Hernández-Espriú et al. (2012) ; Fargione et al. (2008)

Los resultados de la **Tabla 3.** Impacto edafo-hídrico por tipo de combustible revelan que los combustibles fósiles y los biocombustibles de primera generación generan impactos edafo-hídricos opuestos. Los combustibles fósiles contaminan principalmente por derrames de hidrocarburos. En Ecuador, entre 2015 y 2021 se registraron 899 incidentes relacionados con derrames de crudo u otras sustancias contaminantes, con un pico de 248 derrames en 2016, lo que equivale a casi cinco derrames por semana (Peña et al. (2025). Estos derrames alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo: reducen la capacidad de retención de agua, impiden la percolación, disminuyen el intercambio de aire y favorecen la formación de compuestos tóxicos.

Hernández-Espriú et al. (2012) documentó concentraciones de 32,100 mg/kg de hidrocarburos totales de la fracción diésel (TPH-diésel) en suelos agrícolas, una cifra 27 veces superior al límite legal de 1,200 mg/kg en México. Estos valores evidencian la gravedad de la contaminación por derrames y su impacto en la fertilidad del suelo y la seguridad alimentaria.

En contraste, los biocombustibles de primera generación no generan derrames de hidrocarburos, pero introducen un problema ambiental diferente: la eutrofización por escorrentía de fertilizantes. Twomey et al. (2010) cuantificó que la producción de etanol de maíz en Estados Unidos incrementa la carga de nitrógeno en la cuenca del río Mississippi entre un 10% y un 34%, provocando la formación de una zona muerta hipóxica en el Golfo de México. van Wijnen et al. (2015) documentó el mismo fenómeno en las costas europeas, atribuible a la producción de cultivos energéticos. Estos nutrientes estimulan el crecimiento masivo de algas, cuya descomposición agota el oxígeno del agua, creando "zonas muertas" donde la vida acuática no puede sobrevivir.

Los biocombustibles de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos presentan el mejor desempeño edafo-hídrico: no generan eutrofización porque no requieren fertilizantes, no provocan deforestación porque utilizan residuos agrícolas, y no compiten por tierras agrícolas. Esta ventaja los posiciona como la opción más sostenible desde la perspectiva edafo-hídrica.

Toxicidad del material particulado (PM2.5)

La fracción fina del material particulado (PM2.5) representa un indicador crítico de la calidad del aire, dada su asociación con enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Con el fin de comparar la toxicidad de las emisiones generadas por distintas fuentes energéticas, se analizaron estudios de toxicología in vitro desarrollados en células epiteliales pulmonares humanas A549. Los resultados de dichos estudios se sintetizan en la **Tabla 4**. Toxicidad relativa del material particulado (PM2.5) por fuente de combustión, donde se muestra la citotoxicidad relativa del PM2.5 procedente de escape de automóviles, combustión de carbón, quema de biomasa vegetal, biocombustibles de segunda generación y biodiésel, así como la composición química que explica sus diferencias.

Tabla 4. Toxicidad relativa del material particulado (PM2.5) por fuente de combustión

Fuente de PM2.5		Citotoxicidad relativa	Composición química característica
Escape de automóviles	de	Más alta	Fracciones carbonáceas, metales de transición (V, Ni, Cr)
Combustión de carbón	de	Alta	Metales pesados (As, Pb, Hg), carbono elemental
Quema de biomasa vegetal		Menos tóxica (2-5 veces menos que escape)	Carbono orgánico, compuestos fenólicos, menos metales pesados
Biocombustibles B2G (ultrafinas)		Similar a gasolina	Diferentes vías de toxicidad
Biodiésel		Variable	Menos PAH tóxicos, más compuestos carbonílicos

Nota. Adaptado de Luo et al. (2024) ; Southern et al. (2021)

Los resultados de la **Tabla 4.** Toxicidad relativa del material particulado (PM2.5) por fuente de combustión revelan hallazgos de gran relevancia para la comparación entre combustibles fósiles y biocombustibles. Luo et al. (2024) expusieron células epiteliales de adenocarcinoma pulmonar humano (A549) a 30 tipos de muestras de PM2.5 provenientes de tres fuentes antropogénicas principales: escape de automóviles, combustión de carbón y quema de biomasa vegetal (biocombustible doméstico).

La clasificación general de citotoxicidad normalizada por masa fue: Escape de automóviles > Combustión de carbón > Quema de biomasa vegetal > Aire urbano ambiental

Este hallazgo es particularmente significativo, ya que indica que las partículas provenientes de la quema de biomasa (categoría que incluye los biocombustibles sólidos) son 2 a 5 veces menos tóxicas que las de los combustibles fósiles (Luo et al., 2024). La menor toxicidad se atribuye a la composición química: las partículas de biomasa contienen principalmente carbono orgánico y compuestos fenólicos, mientras que las de escape de automóviles y combustión de carbón son ricas en metales de transición redox-activos (V, Ni, Cr) y iones solubles en agua (Ca^{2+} , Mg^{2+} , F^- , Cl^-), que inducen estrés oxidativo e inflamación en las células.

Southern et al. (2021) realizaron un análisis cuantitativo de estudios in vitro y concluyeron que, aunque las partículas de biodiésel contienen menos hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) tóxicos que el diésel fósil, su toxicidad depende críticamente de la materia prima y las condiciones de combustión.

Huella de carbono y análisis de ciclo de vida (LCA)

El análisis de la huella de carbono, al incorporar el cambio indirecto de uso de suelo (iLUC), permite una evaluación más rigurosa del desempeño ambiental de los combustibles. Con este enfoque, se recopilaron valores de emisiones de GEI para combustibles fósiles y biocombustibles de primera y segunda generación, en escenarios con y sin iLUC. La **Tabla 5**. Huella de carbono y emisiones netas por tipo de combustible resume dichos valores (expresados en g CO₂ eq/MJ) e identifica qué combustibles logran emisiones netas negativas.

Tabla 5. Huella de carbono y emisiones netas por tipo de combustible

Combustible	Emisiones iLUC (g eq/MJ)	sin CO ₂	Emisiones iLUC (g eq/MJ)	con CO ₂	Emisiones negativas
Fósiles					
Gas natural	50.0		N/A		No
Gasolina	69.3		N/A		No
Diésel	68.6		N/A		No
Carbón	87.3-91.6		N/A		No
Biocombustibles 1ª generación					
Etanol de maíz	12.9-17.0		15.5-22.6		No
Etanol de switchgrass	20.3-35.5		38.2-74.0		No
Biocombustibles 2ª generación					
Rastrojo de maíz (biogasolina)	-1.0 a -1.1		-1.0 a -1.1		Sí
Rastrojo de maíz (etanol)	-1.0 a -1.5		-0.9 a -1.6		Sí

Nota. Adaptado de Taheripour & Tyner (2013)

Los resultados de la **Tabla 5**. Huella de carbono y emisiones netas por tipo de combustible demuestran que los biocombustibles de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos son la única categoría que logra emisiones netas negativas (-1.0 a -1.6 g CO₂ eq/MJ). Este hallazgo es crucial porque indica que estos

combustibles capturan más carbono del que emiten durante su ciclo de vida, convirtiéndose en sumideros de carbono en lugar de fuentes. En contraste, los combustibles fósiles presentan las emisiones más altas, con el carbón (87.3-91.6 g CO₂/MJ) y el lignito (91.6 g CO₂/MJ) en el extremo superior, y el gas natural (50.0 g CO₂/MJ) en el extremo inferior. La gasolina (69.3 g CO₂/MJ) y el diésel (68.6 g CO₂/MJ) se sitúan en un rango intermedio.

Los biocombustibles de primera generación presentan un comportamiento intermedio. Sin iLUC, el etanol de maíz (12.9-17.0 g CO₂ eq/MJ) y el etanol de switchgrass (20.3-35.5 g CO₂ eq/MJ) son significativamente inferiores a los fósiles. Sin embargo, cuando se incluye el cambio indirecto de uso de suelo, sus emisiones aumentan drásticamente: el etanol de maíz sube a 15.5-22.6 g CO₂ eq/MJ, y el etanol de switchgrass alcanza hasta 74.0 g CO₂ eq/MJ, duplicando la huella de los combustibles fósiles. Este hallazgo confirma la advertencia de Fargione et al. (2008): el cambio de uso de suelo genera una "deuda de carbono" de 17 a 420 veces mayor que las reducciones anuales de GEI que estos biocombustibles proporcionarían al reemplazar combustibles fósiles.

DISCUSIÓN

El análisis comparativo evidencia que no existe un combustible intrínsecamente "limpio", sino que cada opción energética presenta un perfil de impactos ambientales con ventajas y desventajas específicas. Los resultados confirman que los biocombustibles de primera generación (maíz, soya, palma) reducen parcialmente las emisiones de CO₂ respecto a los fósiles, pero generan compensaciones ambientales significativas: eutrofización por escorrentía de fertilizantes (incrementos de carga de nitrógeno de hasta 34%), deforestación por cambio indirecto de uso de suelo (iLUC), y una deuda de carbono que puede ser de 17 a 420 veces mayor que las reducciones anuales de GEI que proporcionan (Fargione et al., 2008; Twomey et al., 2010). Este hallazgo es consistente con Taheripour & Tyner (2013), quienes reportan que el etanol de switchgrass con iLUC alcanza hasta 74.0 g CO₂ eq/MJ, duplicando la huella de los combustibles fósiles.

En el ámbito atmosférico, el biodiésel elimina completamente las emisiones de SO_x por su nulo contenido de azufre (Macor &

Pavanello, 2009), pero incrementa las emisiones de NO_x y formaldehído, contribuyendo a la formación de smog fotoquímico (Prasad et al., 2011). En cuanto a la salud humana, las partículas de biomasa son 2 a 5 veces menos citotóxicas en células pulmonares A549 que las de combustibles fósiles, debido a su menor contenido de metales redox-activos como V, Ni y Cr (Luo et al., 2024).

En el contexto ecuatoriano, los derrames de hidrocarburos constituyen una problemática recurrente: entre 2015 y 2021 se registraron 899 incidentes, con un pico de 248 derrames en 2016, que liberan metales pesados como cadmio y níquel, alterando la fertilidad del suelo y superando en hasta 27 veces los límites legales (Hernández-Espriú et al., 2012; Peña et al., 2025) Este hallazgo subraya la vulnerabilidad de los ecosistemas terrestres y acuáticos frente a la actividad petrolera.

Los biocombustibles de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos representan la única opción que no presenta compensaciones ambientales significativas. Logran emisiones netas negativas (-1.1 g CO₂ eq/MJ), no generan eutrofización porque no requieren fertilizantes, no provocan deforestación porque utilizan residuos agrícolas, y no compiten por tierras agrícolas (Taheripour & Tyner, 2013).

Las limitaciones del estudio incluyen la variabilidad regional de los factores de emisión, la incertidumbre en los modelos de iLUC, y la falta de datos específicos para el contexto ecuatoriano en la producción de biocombustibles. No obstante, los hallazgos son robustos y consistentes con la literatura internacional, lo que permite formular recomendaciones para políticas energéticas: (1) diferenciar entre generaciones de biocombustibles en los marcos regulatorios, (2) priorizar el desarrollo de biocombustibles de segunda generación a partir de residuos, (3) internalizar los costos ambientales del iLUC y la eutrofización mediante mecanismos de precios del carbono, y (4) fortalecer la cooperación internacional para armonizar metodologías de cálculo de emisiones y transferir tecnologías sostenibles.

CONCLUSIÓN

Los combustibles fósiles presentan el mayor impacto en emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación de suelos, pero no generan eutrofización. Sus factores de emisión de CO₂ oscilan entre 50.0 y 91.6 g CO₂/MJ, acompañados de emisiones de SO_x causantes de lluvia ácida y metales pesados como cadmio, níquel y cromo liberados al suelo por derrames. En Ecuador, entre 2015 y 2021 se registraron 899 derrames de hidrocarburos, con un pico de 248 incidentes en 2016, evidenciando la alta vulnerabilidad de los ecosistemas terrestres y acuáticos frente a la actividad petrolera.

Los biocombustibles de primera generación presentan compensaciones ambientales significativas. Aunque reducen parcialmente las emisiones de CO₂, la inclusión del cambio indirecto de uso de suelo puede duplicar su huella de carbono, llegando a superar la de los combustibles fósiles. Adicionalmente, la producción intensiva de cultivos energéticos genera eutrofización por escorrentía de fertilizantes, con incrementos de carga de nitrógeno de hasta 34% en cuencas hidrográficas y formación de zonas muertas hipóxicas en ecosistemas marinos.

El biodiésel reduce drásticamente las emisiones de SO_x pero incrementa NO_x y formaldehído. La eliminación completa de SO_x representa una ventaja significativa frente al diésel fósil. Sin embargo, el incremento de NO_x y compuestos carbonílicos como formaldehído contribuye a la formación de smog fotoquímico, afectando la calidad del aire urbano y la salud respiratoria.

Las partículas de biomasa son menos tóxicas que las de combustibles fósiles. Las partículas provenientes de la quema de biomasa son significativamente menos citotóxicas en células pulmonares humanas que las generadas por escape de automóviles o combustión de carbón, debido a su menor contenido de metales redox-activos.

Los biocombustibles de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos representan la única opción sostenible. Logran emisiones netas negativas, no generan eutrofización porque no requieren fertilizantes, no provocan deforestación porque utilizan residuos agrícolas, y no compiten por tierras agrícolas.

REFERENCES

- Carral, L., Barros, J. J. C., Fidalgo, H. C., Fabal, C. C., & Doce, A. M. (2021). Greenhouse Gas Emissions and Energy Consumption of Coastal Ecosystem Enhancement Programme through Sustainable Artificial Reefs in Galicia. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021, Vol. 18, Page 1909, 18(4), 1909. <https://doi.org/10.3390/IJERPH18041909>
- Cowie, A. L., Berndes, G., Bentsen, N. S., Brandão, M., Cherubini, F., Egnell, G., George, B., Gustavsson, L., Hanewinkel, M., Harris, Z. M., Johnsson, F., Junginger, M., Kline, K. L., Koponen, K., Koppejan, J., Kraxner, F., Lamers, P., Majer, S., Marland, E., ... Ximenes, F. A. (2021). Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy. *GCB Bioenergy*, 13(8), 1210–1231. <https://doi.org/10.1111/GCBB.12844>;WEBSITE:WEBSITE:PERICLES;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:17571707;ISSUE:ISSUE:DOI
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867), 1235–1238. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1152747>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Gracz, W., Marcinkowski, D., Golimowski, W., Szwajca, F., Strzelczyk, M., Wasilewski, J., & Krzaczek, P. (2021). Multifaceted Comparison Efficiency and Emission Characteristics of Multi-Fuel Power Generator Fueled by Different Fuels and Biofuels. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 3388, 14(12), 3388. <https://doi.org/10.3390/EN14123388>
- Hernández-Espriú, A., Sánchez-León, E., Martínez-Santos, P., & Torres, L. G. (2012). Remediation of a diesel-contaminated soil from a pipeline accidental spill: enhanced biodegradation and soil washing processes using natural gums and surfactants. *Journal of Soils and Sediments* 2012 13:1, 13(1), 152–165. <https://doi.org/10.1007/S11368-012-0599-5>
- Luo, X. S., Huang, W., Shen, G., Pang, Y., Tang, M., Li, W., Zhao, Z., Li, H., Wei, Y., Xie, L., & Mehmood,

- T. (2024). Source differences in the components and cytotoxicity of PM_{2.5} from automobile exhaust, coal combustion, and biomass burning contributing to urban aerosol toxicity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(2), 1345–1360. <https://doi.org/10.5194/ACP-24-1345-2024>
- Macor, A., & Pavanello, P. (2009). Performance and emissions of biodiesel in a boiler for residential heating. *Energy*, 34(12), 2025–2032. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2008.08.021>
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy* 2017 2:12, 2(12), 939–945. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
- Peña, S. E. (2018). Impacto de la contaminación atmosférica en dos principales ciudades del Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 10(2), 285–288. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/865>
- Peña, S. E., Ochoa, J. A., Torres, F. J., & Zambrano, E. M. (2025). Fuel subsidies in Ecuador: Bibliographic analysis of their cost and sustainability. *Revista Iberoamericana de Educación*, 9(1), 55–72. <https://doi.org/10.31876/RIE.V9I1.288>
- Peña, S. E., Villa, F. E., Zalamea, J. K., & Fajardo, P. C. (2025). Comparative evaluation of bioremediation and electroremediation methods for soil decontamination by hydrocarbons. *Revista Iberoamericana de Educación*, 9(1), 95–112. <https://doi.org/10.31876/RIE.V9I1.290>
- Peña, S. E., Zambrano, E., Baquerizo, J., Antón, Á., & Solórzano, K. (2019). Nuevos sistemas de tratamientos de suelo - ProQuest. *Evista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 226–236. <https://www.proquest.com/docview/2317841892?fromopenview=true&pq-origsite=gscholar&sourcetype=Scholarly%20Journal>
- Peña, S., Figueroa, J. B., Zambrano Nevárez, E. M., & Torres Ramirez, C. (2025). Ecological Footprint of Hydrocarbon Exploitation: An Analysis of Its

- Environmental Impacts. *Revista Iberoamericana de Educación*, 9(1), 146–166. <https://doi.org/10.31876/RIE.V9I1.294>
- Peña, S., Zambrano, E., Bermeo, D., Reyes, F., Forero, C., Velasco, F., & Arango, E. (2023). Evaluation of Sugarcane Cutting Residues for the Production of Solid Biofuel. *Migration Letters*, 20(S5), 928–940. <https://doi.org/10.59670/ML.V20IS5.4113>
- Prasad, S., Dhanya, M. S., Prasad, S., & Dhanya, M. S. (2011). Air Quality and Biofuels. *Environmental Impact of Biofuels*. <https://doi.org/10.5772/17889>
- Sanhueza, E. (2009). Emisiones de compuestos, incluidos o no en el protocolo de Kyoto, climáticamente activos, durante la producción de etanol de caña de azúcar. *Interciencia*, 34(1), 008–016. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Southern, D., Hellier, P., Talibi, M., Leonard, M. O., & Ladommatos, N. (2021). Re-assessing the toxicity of particles from biodiesel combustion: A quantitative analysis of in vitro studies. *Atmospheric Environment*, 261, Article 118570. (2021), 261. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2021.118570>
- Taheripour, F., & Tyner, W. E. (2013). Induced Land Use Emissions due to First and Second Generation Biofuels and Uncertainty in Land Use Emission Factors. *Economics Research International*, 2013, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2013/315787>
- Twomey, K. M., Stillwell, A. S., & Webber, M. E. (2010). The Water Quality and Energy Impacts of Biofuels. *Proceedings of the ASME 3rd International Conference on Energy Sustainability 2009, ES2009, 1*, 161–169. <https://doi.org/10.1115/ES2009-90294>
- van Wijnen, J., Ivens, W. P. M. F., Kroeze, C., & Löhr, A. J. (2015). Coastal eutrophication in Europe caused by production of energy crops. *Science of The Total Environment*, 511, 101–111. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.12.032>
- Zambrano, E., Peña, S., Correa, W., & Baquerizo, J. (2022). Sistemas aplicados al cambio de matriz productiva de combustibles fósiles por

Biocombustibles en el Ecuador. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação Iberian Journal of Information Systems and Technologies*, 413–423. <https://www.risti.xyz/issues/ristie53.pdf>