

COVER PAGE IN ENGLISH

(solo para artículos en español, portugués o francés)

Proposal for environmental impact mitigation of natural gas emissions from oil wells in eastern Ecuador

Emily Sánchez Zambrano^{1,2} ; Mauricio Méndez-Rodríguez³ ; Jonathan Chica Ramírez² ; Paúl Carrión-Mero^{1,4} 

¹ Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a la Ciencias de la Tierra (CIPAT), Universidad Politécnica ESPOL, *Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Ecuador, emnisanc@espol.edu.ec, joelchic@espol.edu.ec*

² Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), Universidad Politécnica ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador

³ Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Avda. Principal, *La Libertad, 240204, Ecuador, mauricio.mendezrodriguez9455@upse.edu.ec*

⁴ Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), Universidad Politécnica ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Ecuador, pcarrion@espol.edu.ec

Abstract– *The oil and gas sector is responsible for producing 25% of methane generated by human activities worldwide, contributing to global warming at a rate 80 times greater than CO₂. In the Ecuadorian Amazon, oil exploitation is a source of greenhouse gases of approximately 450 million cubic feet per day. This study aims to conduct a literature review on petroleum gas flaring in eastern Ecuador by systematizing documents obtained from the Google Scholar database to generate sustainable strategies based on the Ecuadorian regulatory framework. To this end, a three-phase methodological design was adopted: i) Collection of bibliographic information, ii) Systematic literature review, and iii) Design of mitigation strategies. The results show direct impacts on air quality and nearby communities, associated with more than 400 active flares and 295 unreported flaring points. Furthermore, deficiencies in outdated infrastructure and limited adoption of clean technologies are evident. Therefore, the proposed strategies integrate social and health measures, gas liquids recovery with an estimated 30% increase in LPG production, and energy recovery with a potential of 70 MWh. The findings demonstrate that implementing a comprehensive mitigation plan, aligned with national regulations and international best practices, is technically and environmentally feasible, constituting a concrete alternative for reducing atmospheric impacts and moving towards more efficient and responsible energy management in the Ecuadorian Amazon.*

Keywords– *Natural gas, Environmental impact, Mitigation, Ecuadorian Amazon, Oil industry, Natural gas flaring.*

Propuesta de mitigación de impacto ambiental para las emisiones de gas natural en pozos petroleros del oriente ecuatoriano

Emily Sánchez Zambrano^{1,2} ; Mauricio Méndez-Rodríguez³ ; Jonathan Chica Ramírez² ; Paúl Carrión-Mero^{1,4} 

¹ Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a la Ciencias de la Tierra (CIPAT), Universidad Politécnica ESPOL, *Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Ecuador, emnisanc@espol.edu.ec, joelchic@espol.edu.ec*

² Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), Universidad Politécnica ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador

³ Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Avda. Principal, *La Libertad, 240204, Ecuador, mauricio.mendezrodriguez9455@upse.edu.ec*

⁴ Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), Universidad Politécnica ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Ecuador, pcarrion@espol.edu.ec

Resumen– El sector de petróleo y gas es responsable de producir el 25 % de metano generado por actividades humanas a escala mundial, lo que repercute en el calentamiento global en una escala de 80 veces más que el CO₂. En la Amazonía ecuatoriana, la explotación petrolera constituye una fuente de gases de efecto invernadero de aproximada 450 millones de pies cúbicos diarios. Este estudio tiene como objetivo realizar una revisión de literatura de la quema de gas derivado del petróleo en el oriente ecuatoriano mediante la sistematización de documentos obtenidos de la base de datos de Google scholar para la generación de estrategias sostenibles fundamentadas en el marco normativo ecuatoriano. Para ello, se adoptó un diseño metodológico estructurado en tres fases: i) Recopilación de información bibliográfica, ii) Revisión sistemática de literatura, y iii) Diseño de estrategias de mitigación. Los resultados muestran que existen afectaciones directas en la calidad del aire y comunidades cercanas, asociadas a más de 400 mecheros activos y a 295 puntos de flaring no registrados. Además, se evidencian deficiencias de infraestructura obsoleta y limitada adopción de tecnologías limpias. De esta manera, las estrategias propuestas integran medidas sociales y sanitarias, recuperación de líquidos del gas con un aumento estimado del 30% en la producción de GLP y aprovechamiento energético con un potencial de 70 MWh. Los hallazgos exponen que la implementación de un esquema integral de mitigación, alineado con la regulación nacional y buenas prácticas internacionales, es factible desde el punto de vista técnico y ambiental, constituyendo una alternativa concreta para disminuir los impactos atmosféricos y avanzar hacia una gestión energética más eficiente y responsable en la Amazonía ecuatoriana.

Palabras clave– Gas natural, Impacto ambiental, Mitigación, Amazonía Ecuatoriana, Industria petrolera, Quema de gas natural.

I. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) constituyen uno de los principales desafíos ambientales, debido a su impacto directo sobre el clima y equilibrios ecológicos a escala global [1]. Gases como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) son los principales contribuyentes al GEI, impulsando el cambio climático, generando alteraciones en los ecosistemas y

patrones atmosféricos [2]. El incremento acelerado de sus concentraciones está asociado al desarrollo industrial, la expansión del consumo energético y otras actividades antropogénicas [3].

La extracción de petróleo se desarrolla cerca de poblaciones humanas, lo que incrementa la exposición de las comunidades a riesgos ambientales y sociales [4][5][6]. A escala global, se estima que aproximadamente 70.000 campos petroleros distribuidos en 100 países, con más de 1,6 billones de barriles de petróleo crudo [7]. En este contexto, la industria del petróleo y gas se posiciona como uno de los sectores con mayor emisión de CH₄ a escala mundial [8]. El CH₄, es el segundo gas de efecto invernadero más prevalente después del CO₂, y ha registrado una tasa de crecimiento anual cercana al 1,22% [9]. Desde la era preindustrial, ha contribuido aproximadamente con el 30 % del aumento de la temperatura media global [10], [11], debido a que posee un potencial de calentamiento mayor a corto plazo, lo que posiciona su mitigación como una prioridad climática inmediata.

En Ecuador, más del 60% del territorio de la Amazonía y zonas costeras se encuentra bajo concesión petrolera, lo que representa un riesgo para su alta biodiversidad y para los derechos de las poblaciones que habitan la región [12][13]. El gas natural presente en el Oriente no constituye una industria independiente, sino que es principalmente gas asociado a la extracción de crudo, cuya gestión ha estado vinculada a la quema en mecheros [14]. En provincias como Orellana, estas prácticas persisten pese a decisiones judiciales que ordenan su eliminación, generando impactos en la salud comunitaria, los ecosistemas y los derechos colectivos [15], [16]. Aunque el gas natural es considerado un combustible de transición, su producción enfrenta desafíos ambientales que incluyen emisiones de gases de efecto invernadero, quema ineficiente y limitaciones en los sistemas de monitoreo.

La gestión petrolífera basada en el venteo y quema en mecheros, junto con el manejo inadecuado de aguas de producción, ha generado impactos acumulativos en la calidad

del aire, el agua y la salud pública, además de riesgos a la biodiversidad [17], [18]. En la Amazonía ecuatoriana, se han identificado sitios de quema no reportados, lo que evidencia debilidades en monitoreo y control en el sector petrolero [19]. Por lo tanto, la reducción del CH₄ representa una oportunidad de mitigar la emisión de gases ofreciendo beneficios climáticos y sanitarios. Sin embargo, la falta de tecnologías e implementación de normativas ambientales agrava una problemática que combina vulnerabilidad ecológica, riesgos sociales y pérdida de valor energético desaprovechado. En este contexto se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué estrategias sostenibles, fundamentadas en el marco normativo ecuatoriano, pueden implementarse para mitigar el impacto ambiental asociado a la quema de gas natural en los pozos petroleros del Oriente ecuatoriano? De esta manera, el estudio tiene como objetivo realizar una revisión de literatura de la quema de gas derivado del petróleo en el oriente ecuatoriano mediante la sistematización de documentos obtenidos de la base de datos de Google scholar para la generación de estrategias sostenibles fundamentadas en el marco normativo ecuatoriano.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología del estudio se estructuró en tres fases (Fig. 1). La primera fase, consistió en una búsqueda bibliográfica sistemática mediante el uso de bases académicas reconocidas y ecuaciones de búsqueda definidas con criterios temáticos y geográficos específicos. En la segunda fase, se realizó una revisión sistemática de la literatura seleccionada, aplicando un proceso de análisis crítico, categorización temática y síntesis de hallazgos. Finalmente, en la tercera fase, se diseñaron estrategias de mitigación ambiental fundamentadas en la jerarquía de mitigación, la normativa vigente y la validación mediante grupo focal con expertos.

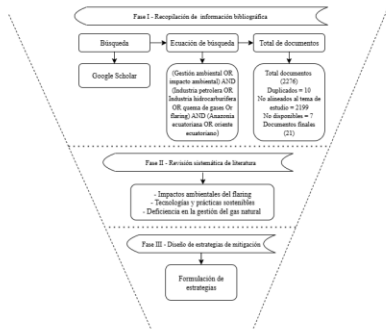


Fig. 1 Diagrama de flujo de la metodología y diseño de estrategias de mitigación de impactos ambientales asociados al flaring en la industria petrolera de la Amazonía ecuatoriana.

A. Fase I - Recopilación de información bibliográfica

En la primera fase se diseñó la ecuación de búsqueda bibliográfica con el objetivo de identificar literatura científica relevante sobre la temática de estudio (Tabla 1) [20]. Debido a que en la base de datos SCOPUS y WOS el número de documentos obtenidos con los términos de búsqueda fue

menos de 10, por ende, se utilizó la base de datos de Google Scholar [21] para la búsqueda de documentos sobre el tema de la quema de gas en el oriente ecuatoriano, que fue procesada con el software Harzing’s Publish or Perish [22], con la finalidad de descargar documentos y generar una base de datos. Además, se definieron términos de búsqueda en inglés y español, unificando variables de gestión ambiental, industria petrolera, gas de desecho (flaring), hidrocarburos y términos asociados a la Amazonía ecuatoriana. El uso de operadores booleanos (AND, OR) permitió combinar los términos asegurando una búsqueda integral de los tópicos [23].

TABLA I
ECUACIÓN DE BÚSQUEDA UTILIZADA RELACIONADA A POZOS PETROLEROS EN EL ORIENTE ECUATORIANO EN LA BASE DE SCOPUS

Variable de estudio	Sinónimos
Pozos petroleros del oriente ecuatoriano	“(Gestión ambiental OR impacto ambiental) AND (industria petrolera OR industria hidrocarburífera OR quema de gases OR flaring) AND (Amazonía ecuatoriana OR oriente ecuatoriano)”

La búsqueda inicial se estableció un rango temporal de 10 años para la selección de los documentos, comprendido entre 2015 y 2025, para analizar la literatura más reciente acorde a la temática. La base de datos obtenida tuvo un proceso de depuración y selección que incluyó la eliminación de duplicados (18), exclusión de documentos no pertinentes al alcance temático (1,212) o geográfico del estudio (624) y revisión de disponibilidad de texto completo (35) (Fig. 2). Luego del proceso de cribado, se seleccionaron los documentos finales para el desarrollo del análisis. Obteniendo como resultado de este proceso un total de 21 documentos validados para el desarrollo del estudio. Adicionalmente, la información fue complementada con fuentes que no se encontraban indexadas en Google Scholar, tales como registros técnicos, legislación ambiental vigente, informes emitidos por el Ministerio del Ambiente, así como reportes sobre tecnologías aplicadas en otros países con características similares. En este contexto, se incorporaron 45 documentos adicionales provenientes de estas fuentes externas, con el objetivo de contextualizar y sistematizar información enfocada en identificar los impactos ambientales, tecnologías y prácticas sostenibles y las principales deficiencias en la gestión del gas.

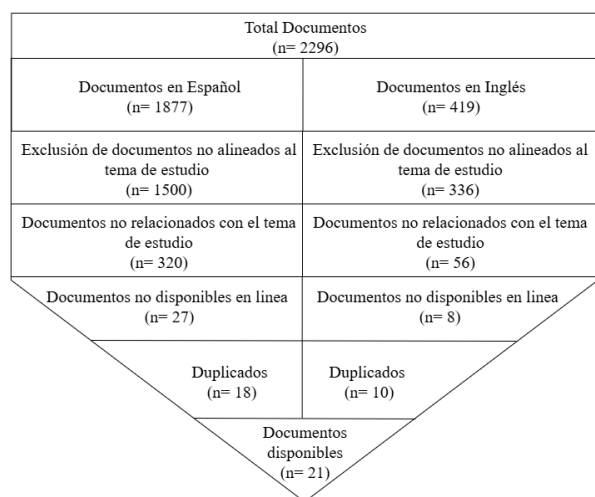


Fig. 2 Proceso de filtrado PRISMA: etapas de depuración, exclusión e inclusión de documentos.

B. Fase II - Revisión sistemática de literatura

La segunda fase correspondió a la revisión sistemática de la literatura [24]. Se evaluaron los 21 estudios que cumplieron con los criterios de inclusión, así como fuentes técnicas y normativas complementarias consideradas relevantes. El proceso de revisión incluyó la extracción de información clave e identificación de variables relacionadas con: (i) impactos ambientales asociados al gas flaring en la Amazonía ecuatoriana, (ii) tecnologías implementadas, y (iii) deficiencias en la gestión del gas.

C. Fase III - Diseño de estrategias de mitigación

La tercera fase estuvo orientada al diseño de estrategias de mitigación destinadas a reducir los impactos ambientales asociados a las emisiones de gas natural, restaurar las funciones ecológicas alteradas, prevenir efectos adversos futuros derivados de la quema (*gas flaring*) y manejo operativo del gas en la Amazonía ecuatoriana [9][25]. La formulación de las propuestas se fundamentó en el enfoque de la jerarquía de mitigación ambiental, adoptado como marco metodológico para la toma de decisiones [26]. Este enfoque, es utilizado en la evaluación y gestión de impactos ambientales enfocado en evitar los impactos ambientales, reducir aquellos que no puedan evitarse, restaurar componentes ambientales afectados y compensar los impactos residuales.

Para ello, se tomó como base los resultados de la revisión desarrollada en las fases previas, normativas nacionales e internacionales vigentes. Además, se desarrolló una sesión de grupo focal con expertos conformado por 6 integrantes de diferentes áreas de estudio, las cuales fueron: un ingeniero ambiental del Campo petrolero Sasha, un ingeniero en petróleo, dos ingenieras geólogas y dos magísteres en petróleo del Oriente ecuatoriano. Durante la sesión del grupo focal, los

participantes expusieron sus criterios respecto a las propuestas presentadas y plantearon estrategias para su fortalecimiento de la propuesta de mitigación ambiental [27].

III. RESULTADOS

De acuerdo con la información revisada y extraída de la base de datos, se presenta de manera sintetizada los tres factores principales en la gestión del gas en campos petroleros.

A. Impactos Ambientales

Los resultados de los estudios revisados, evidencian que la producción de gas natural asociada con la explotación petrolera en el Oriente ecuatoriano ha provocado impactos ambientales sobre la calidad del aire, suelo, la biodiversidad y comunidades locales.

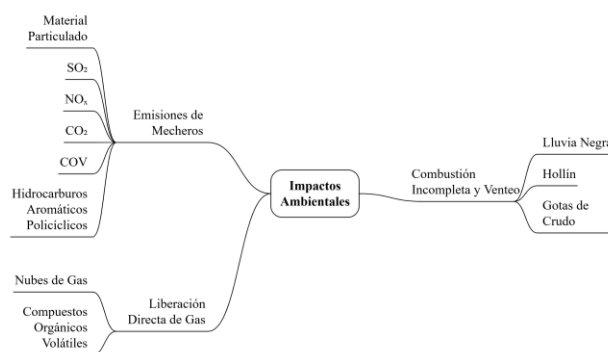


Fig. 3 Impacto ambiental al componente aire.

La Fig. 3 muestra los factores que influyen en la calidad del aire en la Amazonía, asociado a la operación continua de mecheros. De acuerdo con la información revisada se han identificado tres zonas con presencia de campos petroleros que ya registran afectaciones en la calidad del aire. En la zona Texaco (Sacha, Shushufindi, Lago Agrio y Libertador) se registran entre 147 y 205 mecheros activos, generando emisiones de hollín, compuestos tóxicos y fenómenos como “lluvia negra” y potencial lluvia ácida. Estas condiciones se relacionan con olores intensos, irritación, cefaleas y exposición a benceno, sustancia con potencial cancerígeno. En Sucumbios y Orellana, la quema de gas constituye uno de los principales delitos ambientales por contaminación atmosférica, evidenciando la magnitud del impacto [27] [28].

B. Tecnologías y prácticas sostenibles

La revisión de documentos permitió identificar diversos tipos de tecnologías y procesos que contribuyen a mejorar la remediación y reducir el daño ambiental en el Oriente ecuatoriano. La Fig. 4 presenta alternativas de tecnologías y prácticas sostenibles, entre las alternativas documentadas se menciona la reinyección y valorización del gas asociado que pudieran reducir el flaring y mejorar la eficiencia operativa de los campos petroleros [29].4 presenta alternativas de

tecnologías y prácticas sostenibles, entre las alternativas documentadas se menciona la reinyección y valorización del gas asociado que pudieran reducir el flaring y mejorar la eficiencia operativa de los campos petroleros. Asimismo, la recuperación de NGLs y el incremento de la producción de GLP permiten aumentar hasta en un 30 % la oferta de GLP y disminuir aproximadamente 100 millones de pies cúbicos de gas al día (MMscfd) de quema diaria [30]. Por su parte, la implementación de mecheros de alta eficiencia, bajo lineamientos técnicos internacionales, optimiza la combustión y reduce emisiones de contaminantes. Finalmente, el monitoreo de metano mediante drones y sensores remotos facilita la detección temprana de fugas y fortalece los programas de detección y reparación (LDAR) [31]. Estas alternativas se encuentran dentro de las directrices como IFC/EHS, el compromiso *Zero Routine Flaring by 2030* y el marco OGMP 2.0.

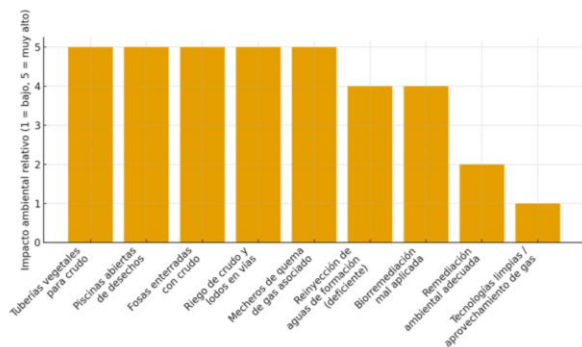


Fig. 4 Comparación cualitativa de impacto ambiental según tecnología usadas en la actividad petrolera. Las prácticas más contaminantes alcanzan valores altos (5), mientras que tecnologías limpias y de aprovechamiento de gas presentan impactos bajos (1–2).

C. Deficiencias en la gestión del gas en la Amazonía Ecuatoriana

La gestión del gas en la Amazonía ecuatoriana presenta deficiencias estructurales asociadas al uso de infraestructura obsoleta y adaptada, con corrosión y abandono de pozos que incrementan riesgos de roturas [28]. Aunque el marco normativo nacional promueve tecnologías limpias y compromisos como la eliminación de la quema rutinaria, en la práctica el flaring continúa siendo el método predominante de manejo del gas asociado, lo que evidencia una brecha entre regulación y aplicación efectiva.

Las tuberías vegetales de crudo aumentan la probabilidad de derrames, exponiendo ecosistemas frágiles a hidrocarburos crudos debido a la vulnerabilidad a deslizamientos y fallas geotécnicas. Tal es el caso del derrame de petróleo en la cuenca del Río Coca, donde debido a deslizamientos la ruptura de tuberías contaminan ríos y suelos, comprometiendo la calidad del agua y la salud de comunidades indígenas [32].

El derrame de crudo y lodo en vías ha provocado que cuerpos de agua como ríos y estuarios queden saturados de crudo, eliminando el oxígeno disuelto (anoxia) y causando la

pérdida de vida acuática. Se han reportado que tramos completos de ríos se vuelven “ríos muertos” debido a la ausencia de fauna tras la contaminación [33]. Por ejemplo, tras la ruptura del sistema de tuberías de petróleo en la provincia de Esmeraldas, cientos de miles de habitantes quedaron sin acceso a agua potable, obligando a las autoridades a cortar el suministro y recurrir a la distribución de agua de emergencia [34].

Existen otros riesgos conocidos como fosas o “pools” de petróleo enterrados, que son estructuras donde se depositaron residuos y crudo durante décadas de extracción petrolera sin un revestimiento adecuado [35]. De acuerdo a reportes técnicos, se han registrado 714 piscinas de petróleo enterradas que han emergido con el tiempo, y 19 fosas adicionales catalogadas como fuentes de contaminación ambiental en las provincias de Sucumbios y Orellana [35][36]. Mientras que, un estudio identifica zonas con mayor vulnerabilidad a contaminación del agua subterránea, mostrando que hasta 13 % de la superficie de la Amazonía norte puede estar impactada por estos pasivos ambientales petroleros [37].

La quema de gas asociado (mecheros) libera grandes cantidades de CO₂, CH₄ y contaminantes atmosféricos como NO_x y compuestos orgánicos volátiles, contribuyendo al calentamiento global y deterioro de la calidad del aire [38]. Un análisis de datos muestra que Ecuador quemó aproximadamente 1,6 mil millones de metros cúbicos de gas asociado a crudo en la Amazonía en 2023, liberando decenas de millones de toneladas de CO₂ equivalente. Esto sitúa a Ecuador como uno de los países más afectados por gas flaring en la región [39]. Asimismo, otro estudio identifica 294 sitios de quema de gas en el norte amazónico, muchos próximos a centros poblados, presentando riesgos para la salud de cerca de 100 000 personas por exposición a emisiones de mecheros [15].

La implementación de estrategias adecuadas de remediación ambiental en Ecuador reduce los impactos ecológicos derivados de la actividad petrolera. Un estudio realizado ha demostrado que cepas de hongos nativos de la Amazonía ecuatoriana pueden degradar hidrocarburos en suelos contaminados [40]. De igual manera, se han usado bacterias *Pseudomonas*, para la bioremediación de suelos urbanos contaminados con hidrocarburos, mostrando que son técnicas de remediación ambiental sustentable y de bajo impacto [41]. Asimismo, se han propuesto estrategias como generación de electricidad mediante turbinas de gas, conversión a GLP y reinyección de gas para mejorar la sostenibilidad y eficiencia en la industria petrolera ecuatoriana que proporciona beneficios ambientales y económicos frente a la quema de gas [42].

D. Estrategias de mitigación

La revisión de documentos e intercambio de criterios desarrollados en el grupo focal permitieron estructurar una propuesta de mitigación ambiental basada en el enfoque de la

jerarquía de mitigación, orientada a evitar, reducir, controlar y compensar los impactos negativos generados por el flaring para fortalecer la gestión ambiental en el área de estudio. La propuesta incorporó criterios de buenas prácticas ambientales, y cumplimiento del marco normativo nacional vigente (RAOHE, TULAS), así como de estándares internacionales (UNEP, EPA, IPCC), con énfasis en la mejora continua y responsabilidad ambiental de los actores involucrados. Además, las acciones planteadas buscan minimizar riesgos ambientales, optimizar el uso de recursos y promover un manejo adecuado de los aspectos ambientales relevantes mediante la integración de medidas preventivas y operativas. A continuación, se presentan las propuestas de mitigación ambiental en la Tabla 1.

TABLA II
 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL GAS
 ASOCIADO Y SUS BENEFICIOS AMBIENTALES EN LA AMAZONÍA ECUATORIANA

Estrategia	Beneficio ambiental	Co-beneficio
Eliminación progresiva del flaring rutinario	Reducción directa de CO ₂ y CH ₄	Cumplimiento normativo y mejora reputacional
Sistemas cerrados de venteo	Disminución de emisiones fugitivas de metano	Mayor eficiencia operativa
Antorchas de alta eficiencia (>99 %)	Minimización de metano no quemado	Optimización de seguridad industrial
Programas LDAR (Leak Detection and Repair)	Identificación temprana de super-emisiones	Reducción de pérdidas económicas
Recuperación de líquidos del gas (NGL)	Disminución de quema innecesaria	Incremento estimado del 30 % en producción de GLP
Generación eléctrica con gas asociado	Sustitución de combustibles más intensivos en carbono	Potencial energético estimado - 70 MWh
Programas de restauración ecológica	Captura de carbono y mejora de biodiversidad	Beneficio social y comunitario
Fortalecimiento de monitoreo y reporte	Mayor transparencia y control regulatorio	Confianza pública y gobernanza

La **Tabla 2** presenta las estrategias orientadas a la eliminación progresiva del flaring rutinario, que reduce de manera directa las emisiones de CO₂ y CH₄, ayuda a fortalecer el cumplimiento normativo ecuatoriano. Asimismo, la incorporación de sistemas cerrados de venteo y antorchas de alta eficiencia minimiza las emisiones fugitivas de CH₄ y mejora la seguridad industrial.

Los programas LDAR permiten identificar de forma temprana super-emisiones y disminuir pérdidas económicas asociadas al desperdicio de gas. De igual manera, la recuperación de líquidos del gas y generación eléctrica con gas asociados que reducen la quema innecesaria y potencian el aprovechamiento energético, con incrementos estimados de hasta 30% en la producción de GLP y un potencial cercano a

70 MWh. Estos valores se fundamentan en un análisis técnico basado en información secundaria y en la interpretación de datos reportados en la literatura científica. En el caso del potencial energético, este se deriva del volumen de gas natural asociado que actualmente no es aprovechado en el Oriente ecuatoriano, el cual oscila entre 55 y 70 millones de pies cúbicos diarios. A partir de este volumen, se realizó una estimación considerando el poder calorífico del gas y eficiencia de conversión energética de tecnologías como microturbinas o generadores, lo que permite inferir su capacidad de generación eléctrica. Finalmente, el fortalecimiento del monitoreo y los programas de restauración ecológica incrementan la transparencia, que promueven la gobernanza ambiental y contribuyen a la captura de carbono, lo que permite la recuperación de la biodiversidad.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La revisión sistemática puso en evidencia que el principal impacto ambiental asociado a la gestión del gas en la Amazonía ecuatoriana recae sobre el componente aire, debido a la presencia de más de 400 mecheros activos y 295 puntos de flaring no registrados oficialmente [43]. Esto reafirma como la quema rutinaria es una fuente primaria de CO₂, CH₄ y contaminantes atmosféricos, esto coincide con lo señalado por [44], quienes identifican que una proporción reducida de fuentes puede concentrar gran parte de las emisiones de metano en la industria petrolera. Asimismo, la persistencia de instalaciones obsoletas y la limitada aplicación de tecnologías limpias refuerzan la hipótesis de que el problema no es únicamente técnico, sino estructural y regulatorio.

La reinyección y aprovechamiento del gas asociado se presenta como una alternativa viable frente a la quema rutinaria en el Oriente ecuatoriano. El gas venteado o quemado en el campo Sacha puede ser captado, procesado y transformado en productos comercializables como GLP. Sin embargo, la estrategia operativa prioriza la estabilidad de producción de petróleo, ya que, la regulación no es muy estricta para obligar la eliminación total de la quema de los derivados del petróleo [45]. Caso contrario pasa con las regulaciones internacionales que demuestran que la reinyección y aprovechamiento de gas asociado han logrado reducciones superiores al 95% del flaring rutinario, mientras que los programas LDAR han permitido disminuir entre 40% y 60% las emisiones fugitivas de CH₄ [28][46][47]. En países como Noruega y Canadá, ha permitido la recuperación de millones de metros cúbicos de gas comercializable, generando retornos de inversión positivos mediante la sustitución de combustibles más costosos e incremento de la productividad del campo petrolero [48], [49]. En contraste, el caso ecuatoriano muestra una brecha en la aplicación de tecnologías y gobernanza, donde la quema sigue siendo un método dominante pese a la evidencia internacional que respalda alternativas más eficientes.

La recuperación de NGLs se perfila como una estrategia con beneficios ambientales y económicos, reduciendo el potencial de calentamiento global y otros impactos ambientales relacionados al tratamiento tradicional de gas asociado [50]. En Ecuador, los campos maduros como Sacha y Shushufindi, la composición del gas asociado presenta fracciones C_2+ y C_3+ suficientes para justificar procesos de separación criogénica y fraccionamiento, lo que permitiría producir GLP y condensados en lugar de liberar emisiones atmosféricas continuas [45]. Sin embargo, la viabilidad económica depende de incentivos regulatorios, tarifas de comercialización y estabilidad normativa, factores que han limitado la inversión en infraestructura gasífera en la región amazónica. Por otro lado, un estudio realizado en Corea presenta mejoras en los procesos de recuperación de NGLs, logrando reducciones de 36,3% en el costo anual total, mostrando una ventaja económica sobre los métodos convencionales de manejo del gas sin recuperación [51]. De igual manera, una evaluación técnico-económica-ambiental realizada en Irán, reporta la reducción del 91% en el potencial de calentamiento global (GWP) y disminuciones de cerca del 83% en impactos de acidificación al implementar procesos de recuperación de NGL [52]. Esto pone en evidencia como la valorización del gas mediante recuperación de NGL se alinea como una estrategia coherente con la realidad ecuatoriana, ya que esto no implica abandono de la actividad petrolera, pero sí una reducción de su impacto climático.

Con respecto a los mecheros de alta eficiencia y sistemas cerrados de venteo, estudios han evaluado la eficiencia de combustión en instalaciones petroleras. En la Amazonía ecuatoriana, la sustitución de mecheros convencionales por antorchas de alta eficiencia y sistemas de venteo cerrado no se ha realizado debido a limitaciones estructurales y regulatorias [53]. Gran parte de la infraestructura petrolera fue diseñada bajo un esquema operativo que contempla la quema como práctica estándar, por lo que su reemplazo requiere inversiones significativas en sistemas de recolección y aprovechamiento del gas. Además, el marco normativo vigente contempla excepciones técnicas para la quema en casos operativos específicos o ante ausencia de infraestructura alternativa, lo que reduce los incentivos para adoptar tecnologías de venteo cerrado y control avanzado de emisiones [54]. Caso contrario pasa en la región del Mar del Norte, donde las mediciones muestran eficiencias de combustión mayores al 98% para CH_4 y C_2H_6 cuando los sistemas de flare son correctamente diseñados y operados, lo que reduce las emisiones fugitivas de metano y otros contaminantes atmosféricos [55]. Esto pone en evidencia como las tecnologías avanzadas pueden alcanzar altas eficiencias, comparado con los mecheros tradicionales que operan de manera inadecuada en el Oriente ecuatoriano.

En relación con el monitoreo de metano mediante drones, sensores y satélites. En Ecuador, existen iniciativas impulsadas por Petroecuador en colaboración con organizaciones internacionales que muestran interés en implementar proyectos de detección y cuantificación de metano mediante tecnologías remotas. No obstante, la

aplicación sistemática de drones, sensores especializados o monitoreo satelital en los campos del Oriente aún no se encuentra institucionalizada ni respaldada por una red de monitoreo permanente [56]. Caso contrario pasa en Polonia, donde estudios realizados con sensores satelitales de alta resolución han identificado más de 500t CH_4 ha^{-1} (toneladas de metano por hectárea), y han evidenciado que entre el 5% y 10% de las instalaciones puede concentrar más del 50% de las emisiones totales en determinadas regiones productoras. Asimismo, las estimaciones satelitales han resultado ser entre dos y tres veces superiores a los valores reportados oficialmente cuando estos se basan en factores promedio [57]. Esto pone en evidencia como la adopción de monitoreo con drones y sensores avanzados permitiría fortalecer la trazabilidad de emisiones. Además, aportarían transparencia, a la reducción de riesgos sanitarios y soporte científico para la toma de decisiones regulatorias.

El aprovechamiento del gas asociado para la generación de energía eléctrica constituye una alternativa técnica y ambientalmente superior frente a la quema rutinaria en mecheros [45]. Estudios como el caso de los campos Shushufindi y Sacha indican que la implementación de sistemas de captura y procesamiento de gas permite alcanzar eficiencias energéticas cercanas al 80%, generar más de 60 MWh diarios en algunos proyectos y reducir significativamente las emisiones de CO_2 al sustituir la quema directa por su valorización energética [30][58]. Además, los análisis técnico-económicos evidencian que esta estrategia no solo disminuye la huella de carbono del sector petrolero, sino que también reduce costos operativos y aumenta la producción nacional de GLP, fortaleciendo la seguridad energética del país [59]. A nivel global, el aprovechamiento energético debido a la producción del gas asociado en lugar de su quema rutinaria ha ganado atención como una estrategia de mitigación ambiental y eficiencia energética en la industria petrolera. Estudios especializados han demostrado que la recuperación y utilización del gas flared para generación eléctrica es económicamente viable y ambientalmente superior, con reducciones de emisiones estimadas entre 50% y 90% frente a la quema sin recuperación [60]. Además, iniciativas internacionales promovidas por el Global Gas Flaring Reduction Partnership y programas nacionales en países como Nigeria muestran como aplicación de políticas, marcos regulatorios y tecnologías de aprovechamiento del gas puede acelerar la transición hacia prácticas de usos productivos de energía, lo que contribuye a la seguridad energética y compromisos de descarbonización global [61].

Las principales limitaciones que presentó la investigación fueron la disponibilidad y calidad de la información, esto se debe a que, en el contexto del Oriente ecuatoriano, existe un acceso restringido a datos actualizados y detallados sobre emisiones reales de metano, volúmenes exactos de gas venteado y eficiencia operativa de tecnologías implementadas en campo. También se considera limitada la validación de la información reportada respecto al potencial energético estimado y el incremento en la producción de GLP, ya que

estas no fueron medidas en campo. En este sentido, investigaciones futuras podrían tomar como instrumento de acción esta investigación para realizar un análisis económico asociadas a estas estrategias. En este sentido, si bien las estrategias planteadas son técnicamente viables, su implementación dependerá de factores externos como disponibilidad de financiamiento, incentivos regulatorios y condiciones del mercado energético.

V. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió identificar los principales impactos ambientales asociados a las emisiones de gas natural en los pozos petroleros del Oriente ecuatoriano. A partir de su sistematización se identificaron 21 documentos extraídos de la base Google scholar y documentación relevante de páginas oficiales y reportes técnicos de empresas petroleras que operan en el Ecuador, mostrando como el flaring y venting rutinario y emisiones de CO₂ y CH₄, afecta la calidad del aire, genera riesgos ambientales y sanitarios sobre ecosistemas altamente vulnerables.

Las propuestas de mitigación ambiental, estructuradas bajo el enfoque de la jerarquía de mitigación y validadas mediante criterio experto, ofrece una base para la gestión de emisiones de gas en la Amazonía ecuatoriana. Estas incluyen la conexión a sistemas de recolección, valorización del gas mediante unidades de recuperación de vapores (VRU), recuperación de líquidos del gas natural (NGL/GLP) y aprovechamiento para generación eléctrica. Asimismo, la optimización de mecheros para eventos de flaring no rutinario, junto con la adopción de estándares internacionales como IFC/EHS, OGMP 2.0 y la iniciativa Zero Routine Flaring by 2030, presentan un enfoque de gestión ambiental con alto potencial para reducir emisiones atmosféricas, minimizar desperdicios energéticos y disminuir riesgos operativos.

De igual manera, la búsqueda de normativas nacionales e internacionales permitieron identificar tecnologías aplicables al contexto amazónico ecuatoriano. Entre las alternativas más relevantes se encuentran la captura, uso o reinyección del gas asociado para la eliminación del flaring rutinario, los programas de detección y reparación de fugas (LDAR), el uso de mecheros de alta eficiencia para eventos no rutinarios, la recuperación de líquidos del gas natural (NGL/GLP), las cuales presentan viabilidad técnica y ambiental para su implementación en el país. Sin embargo, en términos económicos, aprovechar el potencial estimado de 70 MWh y el incremento del 30% en la producción de GLP pudiera verse limitado en su implementación considerando los elevados costos logísticos y periodos de recuperación de inversión más largos y demandan esquemas financieros, regulatorios y operativos específicos que aún no están consolidados para viabilizar el aprovechamiento integral del gas asociado en la región.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Maestría en Petróleo de la UPSE, al Centro de Investigación e Innovación en Geociencias de Ciencias de la Ingeniería (CIGEO) de la UPSE y al Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT) de la ESPOL por el apoyo en el desarrollo de la investigación.

REFERENCES

- [1] A. Malhotra, A. Mathur, S. Diddi, and A. D. Sagar, "Building institutional capacity for addressing climate and sustainable development goals: achieving energy efficiency in India," *Clim. Policy*, vol. 22, no. 5, pp. 652–670, May 2022, doi: 10.1080/14693062.2021.1984195.
- [2] U. A. Bhatti *et al.*, "Global production patterns: Understanding the relationship between greenhouse gas emissions, agriculture greening and climate variability," *Environ. Res.*, vol. 245, p. 118049, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.envres.2023.118049.
- [3] W. F. Lamb *et al.*, "A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018," *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, no. 7, p. 073005, Jul. 2021, doi: 10.1088/1748-9326/abee4e.
- [4] J. E. Johnston, T. Enebish, S. P. Eckel, S. Navarro, and B. Shamasunder, "Respiratory health, pulmonary function and local engagement in urban communities near oil development," *Environ. Res.*, vol. 197, p. 111088, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111088.
- [5] G. Herrera-Franco, P. Escandón-Panchana, K. Erazo, C. Mora-Frank, and E. Berrezueta, "Geoenvironmental analysis of oil extraction activities in urban and rural zones of Santa Elena Province, Ecuador," *Int. J. Energy Prod. Manag.*, vol. 6, no. 3, pp. 211–228, Sep. 2021, doi: 10.2495/EQ-V6-N3-211-228.
- [6] V. Rodríguez-Fiallos, Lady Bravo-Montero, and G. Herrera-Franco, "Analysis of Thermal Stress and Ergonomic Risks in the Oil Industry in Ecuador," *Int. J. Saf. Secur. Eng.*, vol. 15, no. 8, pp. 1755–1765, Aug. 2025, doi: 10.18280/ijss.150820.
- [7] J. E. Johnston, E. Lim, and H. Roh, "Impact of upstream oil extraction and environmental public health: A review of the evidence," *Sci. Total Environ.*, vol. 657, pp. 187–199, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.483.
- [8] J. R. Worden *et al.*, "The 2019 methane budget and uncertainties at 1° resolution and each country through Bayesian integration Of GOSAT total column methane data and a priori inventory estimates," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 22, no. 10, pp. 6811–6841, May 2022, doi: 10.5194/acp-22-6811-2022.
- [9] H. Lu, D. Xie, and Y. F. Cheng, "Methane emissions from the oil and gas supply chain: Characteristics and mitigation," *Nexus*, vol. 2, no. 3, p. 100087, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.nexus.2025.100087.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "Overview of Greenhouse Gase." Accessed: Feb. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [11] United Nations Environment Programme (UNEP), "Methane emissions are driving climate change: Here's how to reduce them." Accessed: Feb. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/methane-emissions-are-driving-climate-change-heres-how-reduce-them>
- [12] A. Gabay, "In the Ecuadorian Amazon, oil threatens decades of Indigenous-led conservation," InfoAmazonia (copublicado con Grist). [Online]. Available: <https://infoamazonia.org/en/2023/12/15/in-the-ecuadorian-amazon-oil-threatens-decades-of-indigenous-led-conservation/>
- [13] G. Herrera-Franco, F. J. Montalván, A. Velastegui-Montoya, and J. Caicedo-Potosí, "Vulnerability in a Populated Coastal Zone and Its Influence by Oil Wells in Santa Elena, Ecuador," *Resources*, vol. 11, no. 8, p. 70, Jul. 2022, doi: 10.3390/resources11080070.
- [14] K. Beltrán, M. Chávez, and A. Szklo, "Associated natural gas flare in the integrated market of the southern cone," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 22, pp. 337–347, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.esr.2018.10.005.
- [15] F. Facchinelli, E. Crescini, G. Della Fera, and M. De Marchi, "The

- Apaguen los Mecheros campaign: Supporting climate justice in the Amazonian cities of Ecuador by estimating the health risks of gas flaring,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 240, p. 104898, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.landurbplan.2023.104898.
- [16] Amnesty International, “Ecuador: Gas flares in the Amazon threaten human rights in the present and future.” [Online]. Available: <https://www.amnesty.org/es/latest/news/2024/08/ecuador-gas-flares-amazon-threatens-human-rights-present-and-future/>
- [17] Boston University School of Public Health, “Oil and Gas Flaring Linked to \$7.4B in Health Damages.” [Online]. Available: <https://www.bu.edu/sph/news/articles/2024/oil-and-gas-flaring-linked-to-7-4-b-in-health-damages/>
- [18] G. O. Aigbe, M. Cotton, and L. C. Stringer, “Global gas flaring and energy justice: An empirical ethics analysis of stakeholder perspectives,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 99, p. 103064, May 2023, doi: 10.1016/j.erss.2023.103064.
- [19] F. Facchinelli *et al.*, “Unburnable and Unleakable Carbon in Western Amazon: Using VIIRS Nightfire Data to Map Gas Flaring and Policy Compliance in the Yasuni Biosphere Reserve,” *Sustainability*, vol. 12, no. 1, p. 58, Dec. 2019, doi: 10.3390/su12010058.
- [20] A. MacFarlane, T. Russell-Rose, and F. Shokraneh, “Search strategy formulation for systematic reviews: Issues, challenges and opportunities,” *Intell. Syst. with Appl.*, vol. 15, p. 200091, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.iswa.2022.200091.
- [21] A. Martín-Martín, E. Orduna-Malea, M. Thelwall, and E. Delgado López-Cózar, “Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories,” *J. Informetr.*, vol. 12, no. 4, pp. 1160–1177, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.joi.2018.09.002.
- [22] A.-W. Harzing, “Publish or Perish.” [Online]. Available: <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
- [23] M. Gusenbauer and S. P. Gauster, “How to search for literature in systematic reviews and meta-analyses: A comprehensive step-by-step guide,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 212, p. 123833, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.techfore.2024.123833.
- [24] H. Snyder, “Literature review as a research methodology: An overview and guidelines,” *J. Bus. Res.*, vol. 104, pp. 333–339, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.
- [25] M. González Tomalá, L. Moreno Alcivar, G. Herrera Franco, D. Campoverde Campoverde, and J. Garcés Vargas, “Management Plan for Access to the Ancón Pozo 001 Geosite, Santa Elena Canton,” in *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024): “Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions*, 2024, doi: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1674.
- [26] K. R. Jones *et al.*, “Spatial analysis to inform the mitigation hierarchy,” *Conserv. Sci. Pract.*, vol. 4, no. 6, Jun. 2022, doi: 10.1111/csp2.12686.
- [27] F. Carrión and A. Mayra, “Propuesta de diseño de una guía metodológica para la aplicación de las normas de Gestión Ambiental: ISO 14040 (2006) – Evaluación del ciclo de vida, principios y marco de referencia e ISO 14044 (2006) – Análisis del ciclo de vida, requisitos y directrices,” Universidad Andina Simón Bolívar, 2020. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10644/7887>
- [28] I. T. Lawson *et al.*, “The vulnerability of tropical peatlands to oil and gas exploration and extraction,” *Prog. Environ. Geogr.*, vol. 1, no. 1–4, pp. 84–114, Dec. 2022, doi: 10.1177/27539687221124046.
- [29] E. A. Jaramillo Barrera and E. R. Sanclemente Ordoñez, “Tecnologías de aprovechamiento de gas natural, para reducir los impactos de mecheros en el campo Auca en el Ecuador,” Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/15505>
- [30] J. L. Carpio Trujillo, N. X. González Vargas, and A. G. Merizalde Calero, “Aprovechamiento del gas asociado en el campo Shushufindi bloque 57 para gas licuado de petróleo (GLP) y producción de energía eléctrica en el año 2024,” Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.ister.edu.ec/bitstream/68000/523/1/CARPIO%20JENNIFER%20C%20GONZALEZ%20VARGAS%20NATALI%20MERIZALDE%20CALERO%20ALEXIS.PDF>
- [31] C. Sanucci, “Evaluación de los niveles de metano en zona de producción petrolera mediante el uso de imágenes satelitales bajo el enfoque de la ciencia de datos,” Universidad Nacional de La Plata, 2021. [Online]. Available: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/133520>
- [32] P. Poma, M. Usca, M. Fdz-Polanco, A. Garcia-Villacres, and T. Toulkeridis, “Landslide and Environmental Risk from Oil Spill due to the Rupture of SOTE and OCP Pipelines, San Rafael Falls, Amazon Basin, Ecuador,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 11, no. 4, p. 1558, Aug. 2021, doi: 10.18517/ijaseit.11.4.13727.
- [33] Mongabay, “Oil spill in Ecuador devastates rivers and wildlife refuge.” [Online]. Available: <https://news.mongabay.com/short-article/2025/03/oil-spill-in-ecuador-devastates-rivers-and-wildlife-refuge/>
- [34] Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, “Cómo el vertido de petróleo en Ecuador está afectando la salud, el agua y los medios de subsistencia.” [Online]. Available: <https://www.ifrc.org/es/articulo/como-el-vertido-petroleo-en-ecuador-esta-afectando-salud-el-agua-y-los-medios-subsistencia>
- [35] Mongabay Latam, “Fosas, derrames y piscinas abandonadas: las huellas de medio siglo de contaminación petrolera no remediada en Ecuador.” [Online]. Available: <https://es.mongabay.com/2023/06/huellas-de-medio-siglo-de-contaminacion-petrolera-no-remediada-en-ecuador/>
- [36] Mongabay Latam, “The oil debt: More than 6,000 polluted sites fester across Amazonian countries,” 2023. [Online]. Available: <https://news.mongabay.com/2023/08/the-oil-debt-more-than-6000-polluted-sites-fester-across-amazonian-countries/>
- [37] J. Durango-Cordero *et al.*, “Risk assessment of unlined oil pits leaking into groundwater in the Ecuadorian Amazon: A modified GIS-DRASTIC approach,” *Appl. Geogr.*, vol. 139, p. 102628, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.apgeog.2021.102628.
- [38] O. G. Fawole, X.-M. Cai, and A. R. MacKenzie, “Gas flaring and resultant air pollution: A review focusing on black carbon,” *Environ. Pollut.*, vol. 216, pp. 182–197, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.envpol.2016.05.075.
- [39] InfoAmazonia, “Every Last Drop: Fifty years of oil exploration and its impacts in the Amazon,” 2025. [Online]. Available: https://infoamazonia.org/wp-content/uploads/2025/10/EveryLastDrop_report-en_250626.pdf
- [40] I. Cipriani-Avila *et al.*, “Mycoremediation of Petroleum-Contaminated Soil Using Native *Ganoderma* and *Trametes* Strains from the Ecuadorian Amazon,” *J. Fungi*, vol. 11, no. 9, p. 651, Sep. 2025, doi: 10.3390/jof11090651.
- [41] A. Polibio Martínez Vega, M. Eulalia Abad Terán, S. Fernando Iglesias Abad, and M. Salvador Álvarez Vera, “Bioremediation of urban soils contaminated with oil by-products - case study Cuenca, Ecuador,” *MATEC Web Conf.*, vol. 396, p. 02014, May 2024, doi: 10.1051/mateconf/202439602014.
- [42] S. E. Trávez Osorio, C. J. Yagos Arias, J. S. Endara Lagaquiza, and J. C. Tapia Molina, “Soluciones energéticas sostenibles: un estudio sobre estrategias para el uso de gas asociado a la extracción de petróleo en la industria ecuatoriana,” *AlfaPublicaciones*, vol. 6, no. 2, pp. 52–72, Apr. 2024, doi: 10.33262/ap.v6i2.467.
- [43] A. A. Alola, S. T. Onifade, C. Magazzino, and H. O. Obekpa, “The effects of gas flaring as moderated by government quality in leading natural gas flaring economies,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 14394, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-38032-w.
- [44] R. A. Alvarez *et al.*, “Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain,” *Science (80-.)*, vol. 361, no. 6398, pp. 186–188, Jul. 2018, doi: 10.1126/science.aar7204.
- [45] D. Ortiz, D. Calderón, A. Viloria, and M. Ricaurte, “A Techno-Economic Analysis of Natural Gas Valuation in the Amazon Region to Increase the Liquefied Petroleum Gas (LPG) Production in Ecuador,” *Resources*, vol. 12, no. 8, p. 91, Aug. 2023, doi:

- 10.3390/resources12080091.
- [46] A. Velastegui-Montoya, P. Escandón-Panchana, G. Peña-Villacreses, and G. Herrera-Franco, "Land use/land cover of petroleum activities in the framework of sustainable development," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 15, p. 100659, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.clet.2023.100659.
- [47] A. P. Ravikumar *et al.*, "Repeated leak detection and repair surveys reduce methane emissions over scale of years," *Environ. Res. Lett.*, vol. 15, no. 3, p. 034029, Mar. 2020, doi: 10.1088/1748-9326/ab6ae1.
- [48] International Energy Agency (IEA), "Driving Down Methane Leaks from the Oil and Gas Industry: A regulatory roadmap and toolkit," Paris, France, 2021. [Online]. Available: https://ica.blob.core.windows.net/assets/db15c076-5482-433c-bead-7238d17e91f2/DrivingDownMethaneLeaksfromtheOilandGasIndustry_Spanish.pdf
- [49] B. Ludwig van, Z. Weiduo Cai, and M. & F. Yu, "Technology and Policy Solutions to Reduce Harmful Natural Gas Flaring," New York, USA, 2020. [Online]. Available: <https://www.sipa.columbia.edu/sites/default/files/migrated/downloads/Capstone%2520report-Final.pdf>
- [50] M. A. Qyyum, A. Naquash, J. Haider, S. A. Al-Sobhi, and M. Lee, "State-of-the-art assessment of natural gas liquids recovery processes: Techno-economic evaluation, policy implications, open issues, and the way forward," *Energy*, vol. 238, p. 121684, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121684.
- [51] A. AlNouss, M. Ibrahim, and S. A. Al-Sobhi, "Potential energy savings and greenhouse gases (GHGs) emissions reduction strategy for natural gas liquid (NGL) recovery: Process simulation and economic evaluation," *J. Clean. Prod.*, vol. 194, pp. 525–539, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.107.
- [52] A. Kazemi, "Natural gas liquids (NGL) recovery: A framework for environmental, technical and economic assessments and optimizations," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 316, p. 121928, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.ces.2025.121928.
- [53] Amnesty International, "Ecuador: Justice has failed the Warriors for the Amazon, but their fight continues." [Online]. Available: <https://www.amnesty.org/en/latest/news/2025/03/ecuador-la-justicia-les-ha-fallado-a-guerreros-amazonia/>
- [54] World Bank, "Ecuador – Flaring and Venting Regulations." [Online]. Available: <https://flaringventingregulations.worldbank.org/ecuador>
- [55] J. T. Shaw *et al.*, "Flaring efficiencies and NO_x emission ratios measured for offshore oil and gas facilities in the North Sea," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, no. 2, pp. 1491–1509, Jan. 2023, doi: 10.5194/acp-23-1491-2023.
- [56] EP Petroecuador, "Resumen Cooperación EP Petroecuador – CATF para la gestión de metano," Ecuador, 2024. [Online]. Available: https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/05/RESUMEN_COOPERACION_EPP_CATF.pdf
- [57] P. Dhariwal and A. Nichol, "Diffusion Models Beat GANs on Image Synthesis," 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2110.11832>
- [58] Y. X. Cusanguá Cisneros, H. M. Sánchez Moncayo, L. M. Calva Sánchez, B. A. Salazar Analuisa, and A. V. Mantilla Rivadeneira, "Aprovechamiento del gas asociado en plataformas petroleras, caso de estudio campo Sacha," *FIGEMPA Investig. y Desarro.*, vol. 12, no. 2, 2021, [Online]. Available: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/624/6242793003/html/>
- [59] El Universo, "Petroecuador licita aprovechamiento de gas de tres mecheros en Cuyabeno, en medio de dudas sobre situación de 400 mecheros en la Amazonía," Guayaquil, Ecuador, Feb. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.eluniverso.com/noticias/economia/petroecuador-licita-aprovechamiento-de-gas-de-tres-mecheros-en-cuyabeno-en-medio-de-dudas-sobre-situacion-de-400-mecheros-en-la-amazonia-nota/>
- [60] A. Khalili-Garakani, M. Nezhadfar, and M. Iravaninia, "Enviro-economic investigation of various flare gas recovery and utilization technologies in upstream and downstream of oil and gas industries," *J. Clean. Prod.*, vol. 346, p. 131218, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131218.
- [61] I. & I. World Bank, "Flaring Management Guidance for the Oil and Gas Industry," World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction/publication/flaring-management-guidance-for-the-oil-and-gas-industry>