

2. Productos químicos verdes y regulaciones ambientales



SILVIA CASTILLO ACOSTA*

DOI: [cc.443.02](https://doi.org/10.4433/02)

Resumen

En las últimas décadas, la industria del petróleo y el gas ha venido experimentado una transformación debido a regulaciones ambientales cada vez más estrictas y la también creciente concientización de la química verde, a fin de reducir o eliminar los riesgos ambientales. En la literatura científica reciente se documenta la investigación y el desarrollo de productos químicos verdes, como surfactantes biodegradables, inhibidores de corrosión de baja toxicidad y aditivos diseñados bajo criterios de degradabilidad y menor persistencia en el medio ambiente. Se han incrementado las menciones del uso de disolventes eutéctico profundos, el uso de materias primas de origen natural y otros compuestos químicos menos contaminantes, aplicables a operaciones en aguas arriba, aguas abajo y el transporte/almacenamiento en esta industria. Paralelamente, los acuerdos regulatorios internacionales, así como las normativas y los lineamientos nacionales, han impulsado los esquemas que restringen el uso de sustancias peligrosas, controlan emisiones y promueven la sustitución de químicos convencionales por alternativas menos contaminantes. Así, estos avances influyen en los productos químicos utilizados, promoviendo que el desempeño técnico de estos sea acompañado por conceptos de sostenibilidad en la actividad de investigación y el desarrollo responsable.

* Doctora en Ciencias. Investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo, México. ORCID: 0000-0003-0771-9758; Scopus: 57219962794; correo electrónico: scastil@imp.mx

Palabras clave: *química verde, productos químicos verdes, regulación ambiental, objetivos de desarrollo sostenible.*

Introducción

La industria del petróleo y el gas sigue desempeñando un papel clave en el suministro energético global y en la provisión de materias primas para la industria química, petroquímica y de materiales. Las actividades de esta industria están históricamente asociadas con un impacto ambiental significativo, incluyendo emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de residuos peligrosos, descargas de aguas contaminadas y la liberación de sustancias químicas persistentes y tóxicas (Speight, 2014). Estas repercusiones han colocado al sector bajo un creciente escrutinio regulatorio y social, lo que ha impulsado una reevaluación profunda del papel de la química en todas las etapas de la cadena de valor petrolera.

En este contexto, la química verde ha emergido como un marco científico y tecnológico clave para transformar el diseño y uso de productos químicos en la industria del petróleo y el gas. La química verde se basa en 12 principios que consideran la prevención de residuos, el diseño de sustancias menos tóxicas, la eficiencia en el uso de los recursos y la degradabilidad ambiental. La química verde ofrece herramientas para reducir los riesgos asociados sin comprometer el desempeño técnico de los procesos industriales (Anastas y Eghbali, 2009). Por ejemplo, recientemente se han reportado estudios enfocados en surfactantes de origen renovable, inhibidores de corrosión menos contaminantes, fluidos de perforación con menor huella ecotóxica y aditivos funcionales diseñados para minimizar la bioacumulación y persistencia ambiental (Sharma *et al.*, 2024), así como productos químicos que no sólo se reportan con buena funcionalidad operativa, sino también mediante análisis de su ciclo de vida, métricas de toxicidad, degradabilidad y alineación con los objetivos climáticos y de sostenibilidad corporativa (Sheldon, 2012).

En cuanto a las regulaciones ambientales, se han incrementado también instrumentos normativos, como el reglamento REACH en la Unión Europea, las directivas sobre emisiones industriales, las restricciones progresivas a

sustancias per- y poli fluoro alquiladas (PFAS) y las políticas de control de emisiones de metano, los cuales han redefinido los requisitos para el uso de productos químicos en actividades petroleras (European Chemicals Agency [ECHA], 2023; U.S. EPA, 2022). Estas regulaciones no sólo buscan mitigar el impacto ambiental, sino que también actúan como motores de innovación, incentivando el desarrollo y la adopción de alternativas químicas más seguras y sostenibles (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Los 12 principios de la química verde

En la tabla 2.1 se describen los 12 principios de la química verde (Anastas y Warner, 2000), los cuales están redefiniendo el papel de investigadores y profesionales, posicionándolos como actores clave en la transición hacia modelos productivos más responsables con el medio ambiente. Estos principios promueven el desarrollo de productos y procesos químicos que reducen la contaminación de suelos y agua, contribuyen a la economía circular y disminuyen los riesgos para la salud humana.

Tabla 2.1. Los 12 principios de la química verde

No.	Descripción
1	Prevenir el desperdicio: diseñar síntesis químicas que eviten el desperdicio. No dejar residuos que tratar ni limpiar.
2	Maximizar la economía atómica: diseñar síntesis de forma que el producto final contenga la máxima proporción de los materiales de partida. Desperdiciar pocos átomos o ninguno.
3	Diseñar síntesis químicas menos peligrosas: diseñar síntesis para utilizar y generar sustancias con poca o ninguna toxicidad para los seres humanos y el medio ambiente.
4	Diseñar productos químicos y químicos más seguros: diseñar productos químicos que sean totalmente eficaces y, al mismo tiempo, tengan poca o ninguna toxicidad.
5	Utilizar disolventes y condiciones de reacción más seguros: evitar el uso de disolventes, agentes de separación u otros productos químicos auxiliares. Si es necesario utilizar estos productos químicos, utilizar los más seguros.
6	Aumentar la eficiencia energética: realizar reacciones químicas a temperatura y presión ambiente siempre que sea posible.
7	Utilizar materias primas renovables: utilizar materias primas renovables en lugar de agotables. Las materias primas renovables suelen provenir de productos agrícolas (biomasa) o residuos de otros procesos; las materias primas agotables suelen ser combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón) o de operaciones mineras.

8	Evitar los derivados químicos: evitar, en la medida de lo posible, el uso de grupos bloqueantes o protectores, así como cualquier modificación temporal. Los derivados utilizan reactivos adicionales y generan residuos.
9	Utilizar catalizadores, no reactivos estequiométricos: minimizar los residuos mediante reacciones catalíticas. Los catalizadores son eficaces en pequeñas cantidades y pueden llevar a cabo una misma reacción muchas veces. Son preferibles a los reactivos estequiométricos que se utilizan en exceso y sólo realizan una reacción una vez.
10	Diseñar productos químicos y productos que se degraden tras su uso: diseñar productos químicos que se descompongan en sustancias inocuas tras su uso, de modo que no se acumulen en el medio ambiente.
11	Análisis en tiempo real para prevenir la contaminación: incluir monitoreo y control en tiempo real durante las síntesis para minimizar o eliminar la formación de subproductos.
12	Minimizar el riesgo de accidentes: diseñar las sustancias químicas y sus formas físicas (sólidas, líquidas o gaseosas) para minimizar el riesgo de accidentes químicos, incluyendo explosiones, incendios y liberaciones al medio ambiente.

Fuente: elaboración propia.

Para la evaluación de estos principios, se han propuesto una serie de métricas en términos de residuos, consumo energético y eficiencia química, con el fin de medir objetivamente su contribución para reducir el impacto negativo al ambiente (Constable *et al.*, 2001).

Productos químicos verdes

Los productos químicos verdes son aquellas sustancias diseñadas para minimizar o eliminar el impacto negativo en el medio ambiente causado por el uso y la generación de residuos peligrosos a lo largo de su ciclo de vida. Paul Anastas y John Wagner (2010) proponen el concepto de química verde, que inicia una filosofía con aplicación a todas las áreas de la química. Esta filosofía se basa en 12 principios, los cuales pueden servir como referencia para evaluar sustancias y procesos existentes según su grado de cumplimiento, y así determinar qué tan “verdes” pueden considerarse. (Anastas y Eghbali, 2010).

Un producto y un proceso químico se pueden diseñar y desarrollar conforme a estos 12 principios de la química verde para incorporarse en la industria petrolera desde su origen con sustancias y procesos sustentables. Minimizar, prevenir o eliminar los riesgos de contaminación es distinto de tratar o remediar la contaminación ya generada, ya que implica la

implementación de acciones preventivas que evitan procesos complejos, riesgos adicionales y costos elevados.

En la industria del petróleo y el gas, existen varios casos de éxito respecto al uso de productos químicos verdes, procesos o prácticas de química sostenible, los cuales buscan reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia de los procesos.

Los disolventes eutécticos profundos (DES, por sus siglas en inglés) son considerados productos verdes porque se formulan a partir de materias primas de origen natural provenientes de plantas, animales y microorganismos, con lo que se reduce la dependencia de solventes orgánicos altamente tóxicos y dañinos para el medio ambiente. Los DES son de preparación simple, biodegradables, seguros, de baja volatilidad y baja toxicidad, versátiles en una amplia gama de aplicaciones y amigables con el medio ambiente (Abbott *et al.*, 2003). Los DES también han reportado buenos resultados como catalizadores (Nazar *et al.*, 2024), deconstructores de biomasa (Baraka *et al.*, 2025), inhibidores de la corrosión (Askari *et al.*, 2021), en alquilación de isobutano con olefinas (Wang *et al.*, 2017), la captura de CO₂ (Liu *et al.*, 2021), entre otras aplicaciones. En el caso de los NADES, estos se preparan a partir de componentes biodegradables y de origen natural, lo que les confiere un carácter más ecológico. Además, presentan un alto potencial para aplicaciones en la recuperación mejorada de petróleo (EOR), la inhibición del hinchamiento de esquistos, los fluidos de fractura y la deshidratación de gas natural, destacando por su bajo impacto ambiental y su adaptabilidad a las condiciones de operación del sector energético (Husain y Abu-Jdayil, 2025; Smith *et al.*, 2014).

Los surfactantes verdes, que pueden incluir derivados de biomasa o estructuras diseñadas para biodegradabilidad, están siendo explorados como alternativas a los tensioactivos petroquímicos convencionales en diversas operaciones industriales, desde la separación de fases hasta la recuperación mejorada de hidrocarburos. En particular, los biosurfactantes microbianos (como ramnolípidos y sofrolípidos) generan interés por su capacidad para emulsificar hidrocarburos y aumentar la biodisponibilidad para degradación biológica, así como por su potencial uso en la remediación ambiental y la recuperación mejorada de petróleo. Incluso se obtienen biosurfactantes como metabolitos secundarios de los microorganismos y

mejora la biorremediación, por lo que el potencial de esta técnica es amplio y continúa en investigación (Zahed *et al.*, 2022)

La corrosión en instalaciones petroleras es uno de los problemas más críticos para la integridad de ductos y equipos, por lo que tiene un impacto en la seguridad, el mantenimiento y la contaminación. Los inhibidores de corrosión que se usan son convencionales, con compuestos que pueden ser tóxicos o ambientalmente persistentes. Sin embargo, la investigación reciente sobre inhibidores de corrosión menos contaminantes se enfoca en moléculas orgánicas y compuestos funcionalizados que reducen la corrosión con una menor toxicidad y tienen una mayor biodegradabilidad. Estudios recientes revisan compuestos orgánicos y estrategias de diseño molecular orientadas a la sostenibilidad para este tipo de aplicaciones industriales (Kumar *et al.*, 2026)

Los líquidos iónicos (LIs) son sales con puntos de fusión bajos que han demostrado un alto potencial en aplicaciones petroleras debido a su estabilidad térmica, conductividad iónica, ausencia de volatilidad y amplia solvencia (aplicaciones en desulfuración, demulsificación, remoción de contaminantes y separaciones de gases). Aunque algunos son convencionales han sido cuestionados por su biodegradabilidad, su capacidad de ser diseñados molecularmente y su desempeño en procesos críticos (como la ruptura de emulsiones agua-petróleo o la inhibición de formación de hidratos); el impacto ambiental depende de su composición específica (De Jesus y Maciel Filho, 2022; Ražić *et al.*, 2024) . En el caos del desarrollo nuevos catalizadores que permiten la producción de combustibles con menor contenido de azufre y de otros contaminantes, se contribuye a una reducción de emisiones en el entorno de uno catálisis ecológica (Akhtar *et al.*, 2024) .

En el tema de la perforación y la extracción de petróleo, se está realizando la sustitución de productos químicos peligrosos por alternativas más seguras y menos tóxicas, mejorando las condiciones de trabajo y reduciendo el riesgo de accidentes. Algunos de estos desarrollos son los geles de baja toxicidad (Guzmán-Lucero *et al.*, 2022)

La implementación de procesos que utilicen menos energía, agua y materiales, minimizando la generación de residuos y reduciendo el impacto ambiental de la industria, también contribuye a obtener productos

amigables con el medio ambiente y mejorar la seguridad laboral y la eficiencia económica del sector.

La integración de productos químicos verdes en la industria del petróleo y el gas debe desarrollar a la par evaluaciones holísticas que incorporen análisis del ciclo de vida (ACV), la toxicidad humana y ambiental, la eficiencia energética de procesos y la compatibilidad con infraestructuras existentes (Doria Serrano, 2009).

Los 12 principios de la química verde constituyen un marco operativo que se alinea de manera directa con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente aquellos relacionados con la producción responsable, la energía, el agua, la acción climática y la salud. En la industria del petróleo y el gas, ésta convergencia ha impulsado una transformación gradual de los productos químicos.

Objetivos de Desarrollo Sostenible

Figura 2.1. Esquema público de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), (Naciones Unidas, 2026)



Fuente: Tomado de Sustainable Development Goals, por Naciones Unidas, s.f. (<https://sdgs.un.org/goals>).

El logro de estos beneficios se atribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la agenda 2030 de la ONU. Estos ODS también son conocidos objetivos mundiales, y son un conjunto

de 17 metas globales interconectadas. Su propósito es abordar los desafíos más urgentes que enfrenta la humanidad y el planeta, guiando esfuerzos para lograr un futuro más justo, próspero y sostenible para todos, sin dejar a nadie atrás. En la figura 2.1 se muestra el esquema público de los ODS (Naciones Unidas, 2018).

Estos ODS se aplican a todos los países miembros, reconociendo la integridad e interdependencia de las dimensiones económica, social y ambiental, las cuales están profundamente interrelacionadas y generan efectos a nivel global. Son ambiciosos porque buscan lograr un cambio al abordar las causas de la pobreza, la desigualdad y la degradación ambiental.

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenibles son:

- 1) Fin de la pobreza
- 2) Hambre cero
- 3) Salud y bienestar
- 4) Educación de calidad
- 5) Igualdad de género
- 6) Agua limpia y saneamiento
- 7) Energía asequible y no contaminante
- 8) Trabajo decente y crecimiento económico
- 9) Industria, innovación e infraestructura
- 10) Reducción de las desigualdades
- 11) Ciudades y comunidades sostenibles
- 12) Producción y consumo responsables
- 13) Acción por el clima
- 14) Vida submarina
- 15) Vida de ecosistemas terrestres
- 16) Paz, justicia e instituciones sólidas
- 17) Alianzas para lograr los objetivos

El cumplimiento de estas metas es fundamental, ya que establecen una base común compartida por gobiernos, empresas, organizaciones civiles y ciudadanía. Esto permite medir y evaluar de manera homogénea los avances, fomenta la cooperación internacional, impulsa la inversión y la formulación

de políticas públicas, y fortalece la rendición de cuentas y la coordinación a nivel global en torno al logro de estos objetivos.

Contribución de productos químicos verdes en la industria del petróleo y el gas

Los químicos verdes pueden contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU al centrarse en la reducción de emisiones, la mejora de la eficiencia energética, la inversión en energías renovables y el apoyo al desarrollo local en las comunidades donde operan. Si bien la industria enfrenta desafíos para abordar el cambio climático, también desempeña un papel importante en el suministro de energía y los recursos esenciales en el desarrollo, por lo que puede aprovechar sus recursos y experiencia para impulsar los ODS (Kinstler, 2022).

La industria del petróleo y el gas están en permanente innovación y desarrollo de tecnologías limpias para ser más sostenibles, minimizar costos, reducir la huella de carbono. Estos desarrollos son estrategias que pueden contribuir a alcanzar los ODS, por ejemplo:

- ODS 7. Energía asequible y no contaminante. Esto puede lograrse mediante la mejora de la eficiencia energética, reduciendo el consumo de energía en las operaciones industriales, así como a través de la inversión en energías renovables y la diversificación de la matriz energética. Fuentes como la solar, eólica e hidroeléctrica contribuyen a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y a fortalecer la seguridad energética. Asimismo, la investigación y el desarrollo de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono pueden favorecer la reducción de emisiones, al igual que una inversión estratégica en gas natural.
- ODS 13. Acción por el clima. Implica reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Para lograr esto, existen diversas iniciativas como la implementación de medidas para minimizar las fugas de metano, la quema de gas y otras emisiones derivadas de las operaciones. Se pueden apoyar a los mecanismos de precios del carbono para incentivar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria del petróleo y continuar fomentando la innovación en tecnologías bajas en carbono que puedan acelerar la transición hacia un futuro energético sostenible.

- ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico. La industria del petróleo es intensiva en empleo y genera oportunidades económicas, contribuyendo al crecimiento económico mediante la creación de puestos de trabajo, el desarrollo de habilidades y la generación de ingresos, especialmente en países en desarrollo. Este impacto debe complementarse con el cumplimiento de normativas orientadas al respeto de los derechos humanos, la equidad de género y la garantía de condiciones laborales seguras.
- ODS 12. Consumo y producción responsables. Con esta meta se promueve la aplicación de los principios de la economía circular, mediante el reciclaje y la reutilización para minimizar la generación de residuos y reducir el impacto ambiental. Asimismo, se busca mejorar la gestión del uso del agua y su reciclaje, con el fin de proteger la salud humana y los ecosistemas.
- ODS 14 Vida Submarina y ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres. Con acciones claras y contundentes de protección de los ecosistemas marinos y terrestres se puede minimizar el impacto de las operaciones de petróleo y gas en los entornos marinos y terrestres. Las prácticas responsables, la prevención de derrames y la restauración del hábitat son cruciales, así como la gestión de los residuos para proteger los ecosistemas y la biodiversidad.

La industria del petróleo y el gas también puede contribuir a la salud y el bienestar (ODS 3), garantizando la salud y la seguridad de los trabajadores y las comunidades, proporcionando acceso a la energía para los centros de salud y apoyando iniciativas para combatir las enfermedades infecciosas. Al invertir en educación (ODS 4) y el desarrollo de habilidades, la industria puede contribuir a abordar la escasez de habilidades en las comunidades locales y promover el empoderamiento económico. La industria también puede contribuir a la paz, la justicia y las instituciones sólidas (ODS 16), promoviendo la transparencia, la rendición de cuentas y la buena gobernanza en sus operaciones, y apoyando iniciativas para combatir la corrupción y promover el estado de derecho.

En conclusión, la industria del petróleo y el gas desempeña un papel fundamental en el logro de los ODS al adoptar prácticas sostenibles para reducir su huella ambiental y contribuir al desarrollo económico y social de las comunidades donde opera. Al alinear sus operaciones con los ODS,

la industria puede contribuir a un futuro más sostenible y equitativo. En la figura 2.2 se esquematiza, de manera general, la interacción de los principios de la química verde con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y algunas aplicaciones en la industria del petróleo y gas.

Figura 2.2. *Interrelaciones entre los principios de la química verde, los ODS y algunas de sus aplicaciones*



Fuente: OpenAI, 2025 ChatGPT.

Regulaciones ambientales internacionales

En el ámbito internacional, México tiene acuerdos y compromisos voluntarios con regulaciones globales que también han sido adoptados por regulaciones nacionales que se aplican a la industria petrolera (Ibarra Sarlat, 2022; Lucatello, 2022).

Algunos de los acuerdos internacionales aceptados por México son los siguientes:

- Convenio Marpol 73/78 (Contaminación por buques). Con este convenio se regulan las descargas de hidrocarburos en operaciones marítimas (plataformas, buques tanque). Aplica la Ley de Navegación y normas de SEMAR/ASEA.

- Convenio de Basilea (Residuos peligrosos). Con este convenio se controlan los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos (lodos de perforación, químicos), en el marco de la LGEEPA y regulado por SEMARNAT/ASEA.
- Acuerdo de París (Cambio climático). Con este acuerdo, México se compromete a reducir emisiones de GEI (metano, CO₂ del sector energético) y, para ello, se cuenta con la Ley General de Cambio Climático y el Programa Especial de Cambio Climático (metano zero).
- Convenio de Biodiversidad (CDB). Con este convenio México se obliga a evaluar el impacto ambiental en ecosistemas en las áreas sensibles donde se realiza alguna exploración. Es regulado por la LGEEPA y los procesos de manifestación de impacto ambiental.

También hay estándares de Organismos Multilaterales como la OCDE, de la cual México es miembro, de donde emanan directrices para empresas multinacionales y recomendaciones sobre químicos que aplican en el uso seguro en las actividades de perforación/refinación de la industria petrolera.

- Banco Mundial. Este banco financia proyectos petroleros bajo el cumplimiento de estándares ambientales y sociales, En los últimos años se ha incrementado la evaluación de su impacto mediante una consulta a los pueblos originarios en el área de la afectación.
- Las normas internacionales derivadas del organismo internacional de estándares (ISO por sus siglas en inglés) son adoptadas de manera voluntaria e implementadas tanto en el sector público como el privado.
- ISO 14001 (Sistemas de Gestión Ambiental). Esta norma es adoptada voluntariamente por PEMEX y contratistas, pero es exigida por ASEA en algunos procesos.
- IPIECA (Asociación Petrolera Internacional). Esta asociación emite la guía sobre la biodiversidad, la gestión de aguas y las emisiones de metano, las cuales son usadas como referencia por la ASEA.
- La OCDE emite guías para pruebas de biodegradación de residuos en el mar y emite los estándares para reportes de sustentabilidad (Global Reporting Initiative).

En cuanto a tratados internacionales, México cuenta con un tratado de libre comercio con Canadá y Estados Unidos, en el cual se incluyen cláusulas ambientales:

- Capítulo 24, Indica que se deben cumplir las leyes ambientales nacionales y previene debilitar normas para atraer inversión.
- Artículo 24.8, Indica que se debe combatir la pesca ilegal y la contaminación marina por hidrocarburos.

A manera de mejorar la gestión y mantener un sistema globalizado, en México se cumplen con regulaciones para un entendimiento internacional. Algunas de ellas son:

El acuerdo entre México y la Unión Europea, en el cual se fomenta la cooperación en regulaciones sobre la eficiencia energética y la reducción de emisiones; el compromiso con el Global Methane Pledge de reducir 30% para 2030 las emisiones de metano. Esto se implementa con la norma NOM-EM-003-ASEA-2017 y el Programa Nacional de Reducción de Emisiones de Metano. Está el convenio OPRC 90, el cual es una cooperación regional con Estados Unidos y Cuba en el caso de derrames, por lo que se cuenta con planes de respuesta. En cuanto a los residuos peligrosos, México se apega a la clasificación según el Sistema Globalmente Armonizado (SGA/ONU) y es implementado por la NOM-018-STPS. También se observa el REACH de la Unión Europea sobre el registro y la evaluación de sustancias químicas para garantizar su seguridad, el TSCA de la EPA para el control de sustancias tóxicas; el convenio de Estocolmo referente a la prohibición de contaminantes orgánicos persistentes (POPS); el convenio de Rotterdam, con el cual se regula el comercio internacional de químicos peligrosos; y el protocolo de Montreal, con los compromisos para la eliminación de sustancias que dañan la capa de ozono.

En general, para la integración a normas internacionales en la industria petrolera, la ASEA es la que actúa como puente entre estándares globales y operadores locales, aunque persisten desafíos en cuanto a la capacidad técnica y financiera para una implementación plena.

Regulaciones ambientales nacionales

La normativa ambiental para el sector petrolero en México está regulada principalmente por la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA), la cual es una normativa extensa y se basa en el marco legal del país:

En la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se cuenta con el artículo 4° Constitucional, el cual reconoce el derecho a un medio ambiente sano; el artículo 25°, en el que se establece la rectoría del estado en energía; y el artículo 27°, en el cual se declara que los recursos naturales (incluyendo los hidrocarburos) son propiedad de la nación.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), donde se establecen las bases para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección del medio ambiente. Regula impactos ambientales, áreas naturales protegidas, residuos peligrosos y emisiones, y exige la manifestación de Impacto Ambiental (MIA) para proyectos petroleros.

- Ley de Aguas Nacionales, la cual controla descargas de aguas residuales y la protección de cuerpos de agua.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, que gestiona los residuos peligrosos (lodos de perforación, aceites usados, etc.).
- Ley de Hidrocarburos, con la cual se regulan las actividades relacionadas con la exploración, extracción, refinación, transporte y almacenamiento de hidrocarburos; obliga a operadores (PEMEX y privados) a cumplir con las normas ambientales y a reparar daños que lleguen a ocasionar.
- Ley de Petróleos Mexicanos.
- Ley de la Comisión Nacional de Energía (CNE), que sustituye a la CRE y CNH.
- Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos, donde se establecen las bases para la regulación y supervisión de las instalaciones y actividades del sector hidrocarburos en materia de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente. Con base en esto, se crea a la ASEA como regulador exclusivo del sector, la cual cuenta con facultades para expedir regulaciones técnicas, así como inspeccionar y sancionar.

Esta leyes buscan garantizar que las actividades del sector petrolero se realicen de manera segura y sostenible, minimizando el impacto ambiental. Para esto, se apoyan en dependencias (SEMARNAT, ASEA, PROFEPA y CONAGUA) competentes. A continuación, se describen algunos ejemplos de la normativa que aplica al sector.

Norma Oficial Mexicana NOM-006-ASEA-2017. Indica las especificaciones y los criterios técnicos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente para el diseño, la construcción, la operación, el mantenimiento, el cierre y el desmantelamiento de las instalaciones terrestres de almacenamiento de petrolíferos y petróleo; la NOM-EM-005-ASEA-2017 contempla la prevención de contaminación en la exploración y producción mar adentro; la NOM-EM-006-ASEA-2017 indica la seguridad industrial y protección ambiental en ductos terrestres; la NOM-010-ASEA-2017 SE utiliza para el manejo de residuos peligrosos del sector; la NOM-EM-003-ASEA-2017 establece el control de emisiones fugitivas en instalaciones y la NOM-EM-004-ASEA-2017 sirve para la prevención de contingencias en terminales de almacenamiento.

Por su parte, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales cuenta con la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites de contaminantes en descargas de aguas residuales; la NOM-002-SEMARNAT-2021, que sirve para el control de descargas al alcantarillado.

De acuerdo con lo anterior, se derivan diversas obligaciones operativas fundamentales para la protección del medio ambiente. Entre ellas se encuentra la Evaluación de Impacto Ambiental (MIA), obligatoria para la instalación de nuevas plataformas, pozos, refinerías o ductos; la elaboración de planes de respuesta ante contingencias, como derrames de hidrocarburos o emergencias químicas; el monitoreo y reporte continuo de emisiones atmosféricas, calidad del agua y generación de residuos; así como la remediación de suelos en caso de contaminación derivada de las actividades propias de la industria petrolera.

Con base en estas normativas, se establecen sanciones para prevenir el incumplimiento, las cuales pueden incluir multas, la suspensión temporal o definitiva de actividades, así como responsabilidad penal en casos de daños ambientales graves, conforme a lo dispuesto en los artículos 414 al 420 del Código Penal Federal.

Por otra parte, los esfuerzos de los gobiernos y del sector empresarial también se reflejan en la obtención de certificaciones y reconocimientos que buscan evidenciar el cumplimiento de compromisos ambientales. En este sentido, se participa en esquemas como la Etiqueta Ecológica de la Unión Europea (UE Ecolabel), un programa voluntario que distingue productos y servicios con menor impacto ambiental; el programa Safer Choice de la EPA, que identifica productos de alto desempeño seguros para la salud humana y el medio ambiente y promueve prácticas orientadas a la reducción de la contaminación; y la certificación bajo la norma ISO 14001, que establece un sistema de gestión ambiental diseñado para proporcionar a las organizaciones un marco de referencia que les permita proteger el medio ambiente y responder a condiciones cambiantes, en equilibrio con las necesidades socioeconómicas.

Desafíos ambientales en la industria del petróleo y el gas

La industria del petróleo y el gas enfrenta diversos desafíos en la implementación de productos y procesos sostenibles, eficientes y seguros, tanto para los gobiernos como para las empresas privadas y el mercado. Entre estos retos se encuentran la alineación de las normativas regionales con los estándares internacionales más exigentes; el fortalecimiento de la vigilancia por parte de las dependencias responsables, como la ASEA y la PROFEPA, mediante el uso de tecnologías avanzadas —por ejemplo, el monitoreo satelital para la detección de emisiones (Mohammadimanesh *et al.*, 2025)—; la aplicación efectiva de sanciones ante incumplimientos que pueden derivar en conflictos comerciales; y la adopción integral de criterios de economía circular, entre otros.

Estos desafíos implican, a su vez, costos elevados en producción e investigación y desarrollo, limitaciones tecnológicas para escalar alternativas más sostenibles y la persistente resistencia al cambio en industrias tradicionales. Por ello, resulta fundamental impulsar mecanismos de apoyo como subsidios gubernamentales, incentivos fiscales y fondos para la innovación. Por ejemplo, muchos solventes verdes y NADES requieren evaluaciones exhaustivas de estabilidad térmica y química bajo condiciones extremas de operación en

pozos o plantas. Asimismo, los esquemas de costos en la producción industrial de materiales verdes aún enfrentan barreras económicas frente a soluciones convencionales, lo que exige evaluaciones ambientales integrales que incluyan datos de ecotoxicidad y persistencia, así como investigación adicional para garantizar beneficios netos (Fong, 2023).

En este contexto, el uso de la inteligencia artificial ha dejado de ser una tendencia futura para convertirse en una herramienta imprescindible. Su aplicación en el diseño de moléculas verdes mediante algoritmos, así como en el desarrollo de procesos a gran escala basados en biomasa para la producción de biocombustibles, representa una vía prometedora para avanzar hacia una industria más sostenible.

Conclusiones

El uso de productos y procesos químicos verdes en la industria del petróleo y el gas aporta beneficios significativos en términos de sostenibilidad y eficiencia. Estos enfoques permiten mitigar el impacto ambiental negativo al minimizar o eliminar la generación de residuos peligrosos, favorecer operaciones más seguras, reducir la emisión de contaminantes y promover el uso de materias primas renovables. De este modo, contribuyen a alcanzar un equilibrio entre la producción de energía, la protección del medio ambiente y el cumplimiento de regulaciones ambientales cada vez más estrictas.

Otro beneficio relevante es la mejora en la seguridad y la salud de los trabajadores, ya que los productos químicos verdes están diseñados para ser menos tóxicos y más seguros de manejar. Esto contribuye a reducir los riesgos de exposición a sustancias peligrosas y a mejorar las condiciones laborales en la industria.

La literatura científica reciente muestra un interés creciente en el desarrollo de productos químicos verdes con aplicaciones específicas en la industria del petróleo y el gas. Entre estos destacan los solventes eutécticos profundos y los NADES, los surfactantes biodegradables, los inhibidores de corrosión verdes y los líquidos iónicos modificados, así como enfoques integrales que incorporan criterios de evaluación del ciclo de vida.

No obstante, el principal desafío para la industria radica en innovar y evaluar estos productos a escala industrial, lo que implica inversiones significativas. A pesar de ello, la adopción de procesos más sostenibles y eficientes no solo reduce el consumo energético, sino que también puede generar ahorros económicos a largo plazo y favorecer la recuperación de la inversión inicial.

Referencias

- Abbott, A. P., Capper, G., Davies, D. L., Rasheed, R. K., y Tambyrajah, V. (2003). Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. Electronic supplementary information (ESI) available: Spectroscopic data. See <http://www.rsc.org/suppdata/cc/b2/b210714g/>. *Chemical Communications*, (1), 70–71. <https://doi.org/10.1039/b210714g>
- Akhtar, M. S., Ali, S., y Zaman, W. (2024). Recent Advancements in Catalysts for Petroleum Refining. *Catalysts*, 14(12), 841. <https://doi.org/10.3390/catal14120841>
- Anastas, P., y Eghbali, N. (2009). Green Chemistry: Principles and Practice. *Chemical Society Reviews*, 39(1), 301–312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Anastas, P., y Eghbali, N. (2010). Green Chemistry: Principles and Practice. *Chem. Soc. Rev.*, 39(1), 301–312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Anastas, P. T., y Warner, J. C. (2000). *Green chemistry: Theory and practice* (1. paperback). Oxford University Press.
- Askari, M., Aliofkhazraei, M., Jafari, R., Hamghalam, P., y Hajizadeh, A. (2021). Downhole corrosion inhibitors for oil and gas production – a review. *Applied Surface Science Advances*, 6, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100128>
- Baraka, F., Langari, M. M., Beitia, I., Dávila, I., Labidi, J., Morales, A., y Sillero, L. (2025). Enhancing lignocellulosic biomass pretreatment with choline chloride-based deep eutectic solvents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3), 117087. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117087>
- Constable, D. J. C., Curzons, A. D., Freitas Dos Santos, L. M., Geen, G. R., Kitteringham, J., Smith, P., Hannah, R. E., McGuire, M. A., Webb, R. L., Yu, M., Hayler, J. D., y Richardson, J. E. (2001). Green chemistry measures for process research and development. *Green Chemistry*, 3(1), 7–9. <https://doi.org/10.1039/b007875I>
- De Jesus, S. S., y Maciel Filho, R. (2022). Are ionic liquids eco-friendly? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112039>
- Doria Serrano, Ma. D. C. (2009). Química verde: Un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educación Química*, 20(4), 412–420. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30044-2](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30044-2)
- Fong, Y. Y. (2023). *Sustainable Processes and Clean Energy Transition: ICSuPCET2022* (1st ed). Materials Research Forum LLC.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., y Hultink, E. J. (2017). The Circular Econ-

- omy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Guzmán-Lucero, D., Martínez-Palou, R., Palomeque-Santiago, J. F., Vega-Paz, A., Guzmán-Pantoja, J., López-Falcón, D. A., Guevara-Rodríguez, F. de J., García-Muñoz, N. A., Castillo-Acosta, S., y Likhanova, N. V. (2022). Water Control with Gels Based on Synthetic Polymers under Extreme Conditions in Oil Wells. *Chemical Engineering & Technology*, 45(6), 998–1016. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100648>
- Husain, A., y Abu-Jdayil, B. (2025). Natural deep eutectic solvent for exclusive and assured green enhanced oil recovery and other oil and gas applications: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 434, 128019. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.128019>
- Ibarra Sarlat, R. (2022). Particularities of the Legal Framework for the Mexican Emissions Trading System. En S. Lucatello (Ed.), *Towards an Emissions Trading System in Mexico: Rationale, Design and Connections with the Global Climate Agenda* (pp. 109–131). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82759-5_6
- Kinstler, A. (2022, junio 8). *How suppliers in the oil and gas industry can contribute to the implementation of the Sustainable Development Goals*. AS-Schneider. Logo of the AS-Schneider Group - valves and manifold manufacturer.
- Kumar, N., Anunay, P., Kumar, S., Meena, L. K., y Singh, D. (2026). An overview on emerging green organic corrosion inhibitors: Sustainable solution for oil and gas industrial applications. *RSC Advances*, 16(5), 3909–3948. <https://doi.org/10.1039/D5RA08166A>
- Liu, F., Xue, Z., Lan, X., Liu, Z., y Mu, T. (2021). CO₂ switchable deep eutectic solvents for reversible emulsion phase separation. *Chemical Communications*, 57(5), 627–630. <https://doi.org/10.1039/D0CC06963A>
- Lucatello, S. (Ed.). (2022). *Towards an Emissions Trading System in Mexico: Rationale, Design and Connections with the Global Climate Agenda: Outlook on the first ETS in Latin-America and Exploration of the Way Forward*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82759-5>
- Mohammadimanesh, F., Mahdianpari, M., Radman, A., Varon, D., Hemati, M., y Marjani, M. (2025). Advancements in satellite-based methane point source monitoring: A systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 224, 94–112. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.03.020>
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe: LC/G.2681-P/Rev.3*.
- Nazar, M., Hussain, S. M. S., y Kamal, M. S. (2024). Deep Eutectic Solvents: Comprehensive Review and Future Directions on Synthesis and Oilfield Applications. *Energy & Fuels*, 38(12), 10653–10672. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01582>
- Ražić, S., Gadžurić, S., y Trtić-Petrović, T. (2024). Ionic liquids in green analytical chemistry—Are they that good and green enough? *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 416(9), 2023–2029. <https://doi.org/10.1007/s00216-023-05045-3>
- Sharma, V. K., Monteleone, G., Braccio, G., Anyanwu, C. N., y Aneke, N. N. (2024). A Comprehensive Review of Green Energy Technologies: Towards Sustainable Clean Energy Transition and Global Net-Zero Carbon Emissions. *Processes*, 13(1), 69. <https://doi.org/10.3390/pr13010069>

- Sheldon, R. A. (2012). Fundamentals of green chemistry: Efficiency in reaction design. *Chem. Soc. Rev.*, 41(4), 1437–1451. <https://doi.org/10.1039/C1CS15219J>
- Smith, E. L., Abbott, A. P., y Ryder, K. S. (2014). Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications. *Chemical Reviews*, 114(21), 11060–11082. <https://doi.org/10.1021/cr300162p>
- Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (0 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16559>
- United Nations. (2026). *Sustainable Development Goals*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>
- Wang, H., Meng, X., Zhao, G., y Zhang, S. (2017). Isobutane/butene alkylation catalyzed by ionic liquids: A more sustainable process for clean oil production. *Green Chemistry*, 19(6), 1462–1489. <https://doi.org/10.1039/C6GC02791A>
- Zahed, M. A., Matinvafa, M. A., Azari, A., y Mohajeri, L. (2022). Biosurfactant, a green and effective solution for bioremediation of petroleum hydrocarbons in the aquatic environment. *Discover Water*, 2(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s43832-022-00013-x>