

**ONU**   
programa para el  
medio ambiente

**50**   
1972-2022

**QUÍMICA  
VERDE Y  
SOSTENIBLE:  
MANUAL DE  
REFERENCIA**



## Reproducción

Esta publicación puede ser reproducida total o parcialmente y en cualquier formato con fines educativos o no lucrativos sin necesidad de permiso especial del titular de los derechos de autor, siempre que se cite la fuente. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente agradecería recibir una copia de cualquier publicación que utilice la presente publicación como fuente.

No está permitido utilizar esta publicación para su reventa ni con cualesquiera otros fines comerciales sin la autorización previa y por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

## Descargo de responsabilidad

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras. Además, las opiniones expresadas no representan necesariamente la decisión o la política declarada del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, ni la citación de nombres comerciales o procesos comerciales constituye un respaldo.

## Agradecimientos

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente desea agradecer a todas las personas y organizaciones que han contribuido generosamente con su experiencia, tiempo y energía.

El Manual de referencia fue preparado por la Subdivisión de Productos Químicos y Salud de la División de Economía del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente con el apoyo de:

Autor principal: Achim Halpaap

Coordinadora del proyecto: Sandra Averous-Monnery

información adicional valiosa dentro del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente fue proporcionado para la preparación de los manuales por Monika Gail MacDevette, Jacqueline Alvarez, Josiane Aboniyo, Colin Hannahan, Amelie Ritscher and Tapiwa Nxele.

Un grupo de expertos integró un grupo asesor encargado de proporcionar orientación, aportaciones y comentarios por escrito sobre las anotaciones del boceto y los borradores del Manual de referencia. Ellos fueron: Sam Adu-Kumi (Chemicals Control and Management Centre, Ghana), Paul Anastas (Yale University), Ahmad Ansari and Peter Gregory (ZDHC Foundation), Cristina de Avila and Juergen Helbig (European Commission), Marie-Ange Baucher and Bob Diderich (Organisation for Economic Cooperation and Development), Lorena Betancor (Universidad Ort Uruguay), Richard Blume and Dirk Uhlemann (The Natural Step), Ryan Bouldin (International Pollutants Elimination Network), Irene Caldwell (Horizontal and International Policy Division, Canada), William Carroll (University of Indiana), Claudio Cinquemani, Agnes Dittmar, Creta Gambillara and Janina Haubenreißer (International Sustainable Chemistry Collaborative Centre), Atul Bagai, Divya Datt and Bettina Heller (United Nations Environment Programme), Jost Dittkrist (Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions), Jutta Emig, Steffi Richter and Hans-Christian Stolzenberg (German Environment Agency), Claire Gouvary (Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères), Jean Grundy, Suzanne Leppinen and Victoria Tunstall (Health Canada), Servet Gören, (Cefic), Susan Haffmans (PAN Germany), Klaus Kümmerer (Leuphana University), Marie-Claire Lhenry (Direction générale de la prévention des risques), Anna S. Makarova (Mendeleev University of Chemical Technology of Russia), Brandon Morris (Dow Chemical Company / International Congress and Convention Association), Christoph Neumann (Croplife), Carlos Ocampo (Universidad Pontificia Bolivariana), Rory O'Neill (Hazards magazine), Sharma Rajeev (India Glycols Ltd.), Petra Schwager (United Nations Industrial Development Organization), Nydia Suppen (Center for Life Cycle Analysis and Sustainable Design), Blandine Trouille (US Department of Commerce), Pietro Tundo (University of Venice/ International Union of Pure and Applied Chemistry), Luis Humberto Umazor Hernandez (United Nations Industrial Development Organization), Claudia A. Pena Urrutia (Asociación de la Industria Eléctrica-Electrónica), Meriel Watts (Pesticide Action Network) and Vania Zuin (York University).

Se recibieron observaciones adicionales de: Laetitia Montero Catusse, Elisa Tonda, Ran Xie (United Nations Environment Programme), Kristof Doucot, Claudia Kamke, Carolin Sanz Noriega and Maryna Yanush (United Nations Economic Commission for Europe), Peter Fantke (Technical University of Denmark), Kei Ohno-Woodall (Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions), Ajiniyaz Reimov (United Nations Development Programme) and Joel Tickner (University of Massachusetts Lowell).

El proyecto de informe se distribuyó a los demás miembros del Programa Interinstitucional para la Gestión Racional de los Productos Químicos (IOMC) para que formularan observaciones.

El informe ha sido elaborado con la ayuda financiera del Gobierno de Alemania y el Gobierno del Suecia

Derecho de autor © Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente 202X.

Núm. de ISBN: XXX-XX-XXX-XXXX-X

Núm. de trabajo: DTI/XXXX/GE

Maquetación y diseño gráfico: Lowil Espada.

Comentarios y contacto: el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente anima a los lectores interesados en este informe a participar y compartir sus opiniones.

Correo electrónico: [science.chemicals@un.org](mailto:science.chemicals@un.org)

Sitio web: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/chemicals-waste>

**Sobre la  
Química  
Verde y  
Sostenible**  
Manual de  
Referencia

El presente Manual de referencia sobre la química verde y sostenible ha sido elaborado en cumplimiento del mandato recibido de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente en 2019, en virtud de su resolución 4/8. Su principal objetivo es facilitar una mejor comprensión y proporcionar orientación a los países y a los interesados pertinentes para respecto de la promoción de la química verde y sostenible. El Manual se complementará con un resumen para los responsables de la adopción de decisiones, así como con manuales específicos, si los recursos lo permiten, que abarquen temas concretos por determinar.

Un grupo de expertos proporcionó orientación sobre el boceto del Manual en un taller celebrado los días 5 y 6 de diciembre de 2019 en Ginebra (Suiza). En una versión revisada se han tenido en cuenta los comentarios y consejos proporcionados. En una reunión virtual de expertos celebrada el 22 de junio de 2020 se revisó un primer borrador del Manual de referencia. En la elaboración del presente proyecto revisado se han tenido en cuenta las aportaciones recibidas en la reunión y las observaciones por escrito aportadas por expertos. Durante el cuarto trimestre de 2020 se llevó a cabo un último proceso de consulta para realizar las aportaciones finales al proyecto de Manual.

## Índice

### 1 INTRODUCCIÓN

página 1

### 2 LA QUÍMICA Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE: **RETOS Y OPORTUNIDADES**

página 9

### 3 ¿QUÉ SE PUEDE CONSEGUIR CON LA ADOPCIÓN DE MEDIDAS EN EL ÁMBITO DE LA QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBLE? **OBJETIVOS Y CONSIDERACIONES ORIENTATIVAS**

página 29

### 4 **INNOVACIÓN QUÍMICA Y TECNOLÓGICA** PARA PROMOVER LA QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBLE

página 39





**5 POLÍTICAS,  
HERRAMIENTAS  
E INSTRUMENTOS  
DE FACILITACIÓN**  
PARA PROMOVER LA  
QUÍMICA VERDE Y  
SOSTENIBLE

página **59**

**6 SECTORES Y  
PROGRAMAS DE  
FACILITACIÓN** PARA  
PROMOVER LA QUÍMICA  
VERDE Y SOSTENIBLE

página **71**

**7 CRITERIOS  
DE MEDICIÓN  
Y PRESENTACIÓN  
DE INFORMES** PARA  
PROMOVER LA QUÍMICA  
VERDE Y SOSTENIBLE

página **81**

**8  
ELABORACIÓN  
POR LOS  
INTERESADOS DE  
HOJAS DE RUTA SOBRE  
LA QUÍMICA VERDE Y  
SOSTENIBLE**

página **87**





# INTRODUCCIÓN >

Antecedentes	2
Mandato del presente Manual	3
Propósito y enfoque	3
Reseña del Manual de referencia	4
Participación de los interesados en la preparación del Manual	7

# Antecedentes

---

Los conceptos de química verde y sostenible han logrado atraer considerable atención en todo el mundo, dado su potencial para innovar y hacer avanzar la química con el fin de contribuir a la consecución de los objetivos y metas mundiales de desarrollo sostenible. Si bien el concepto de “química verde” fue el resultado de los conocidos 12 principios publicados en 1998 (Anastas and Warner 1998), la “química sostenible” ha evolucionado recientemente como un concepto estrechamente relacionado, aunque más holístico (Blum *et al.* 2017; Kümmerer 2017).

En el presente Manual se hace un balance de la evolución y los avances en el campo de la química verde y sostenible, incluidas sus dimensiones científicas y sociales. Sobre la base de este debate, se ofrecen orientaciones que se consideran pertinentes para que los distintos interesados puedan potenciar las acciones en materia de innovación en el ámbito de la química verde y sostenible y evaluar las prácticas de gestión. El Manual se basa en el informe de 2019 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), titulado “Analysis of Stakeholder Submissions on Sustainable Chemistry Pursuant to UNEA Resolution 2/7” (UNEP 2019a), que se debatió en el cuarto período de sesiones de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente en 2019.

El informe del PNUMA (2019a) antes mencionado resumió más de 50 propuestas de los interesados presentadas como mejores prácticas en materia de química sostenible. En él se señaló que, a pesar de los valiosos progresos realizados, la identificación de las mejores prácticas es una tarea difícil, dada la ausencia de criterios de evaluación comunes. También se señaló que los interesados tenían amplios conocimientos de la química sostenible. Basándose en el análisis, el informe acogió con beneplácito una mayor cooperación para facilitar una comprensión común del concepto de química sostenible, incluida la relación entre la química verde y la sostenible.

El segundo informe Perspectivas de los Productos Químicos a Nivel Mundial, publicado por el PNUMA en 2019 (UNEP 2019b), ofrece más información sobre las oportunidades para promover la química verde y sostenible a lo largo de las cadenas de valor y suministro. El informe aboga por una acción transformadora y destaca las oportunidades de adoptar medidas para reforzar un marco propicio para la promoción de la química verde y sostenible.



# Mandato del presente Manual

---

La resolución 4/8 sobre la gestión racional de los productos químicos y los desechos adoptada por la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente en su cuarto período de sesiones en 2019, acogió con beneplácito el análisis de las prácticas óptimas en materia de química sostenible llevado a cabo por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y reconoció el valor de conocer mejor las oportunidades que ofrece la química sostenible en todo el mundo. En la resolución se “solicitó a la Dirección Ejecutiva que, con sujeción a la disponibilidad de recursos y, cuando proceda, en cooperación con las organizaciones miembros del Programa Interinstitucional para la Gestión

Racional de Productos Químicos, sintetizase los análisis preparados por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente sobre las prácticas óptimas de química sostenible en manuales sobre química verde y sostenible, en consulta con los interesados pertinentes, para el quinto período de sesiones de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, y continuase trabajando en un enfoque holístico a largo plazo de la gestión racional de los productos químicos y los desechos, teniendo en cuenta la importancia de la gestión racional de los productos químicos y los beneficios potenciales de los productos químicos para el desarrollo sostenible”.

## Propósito y enfoque

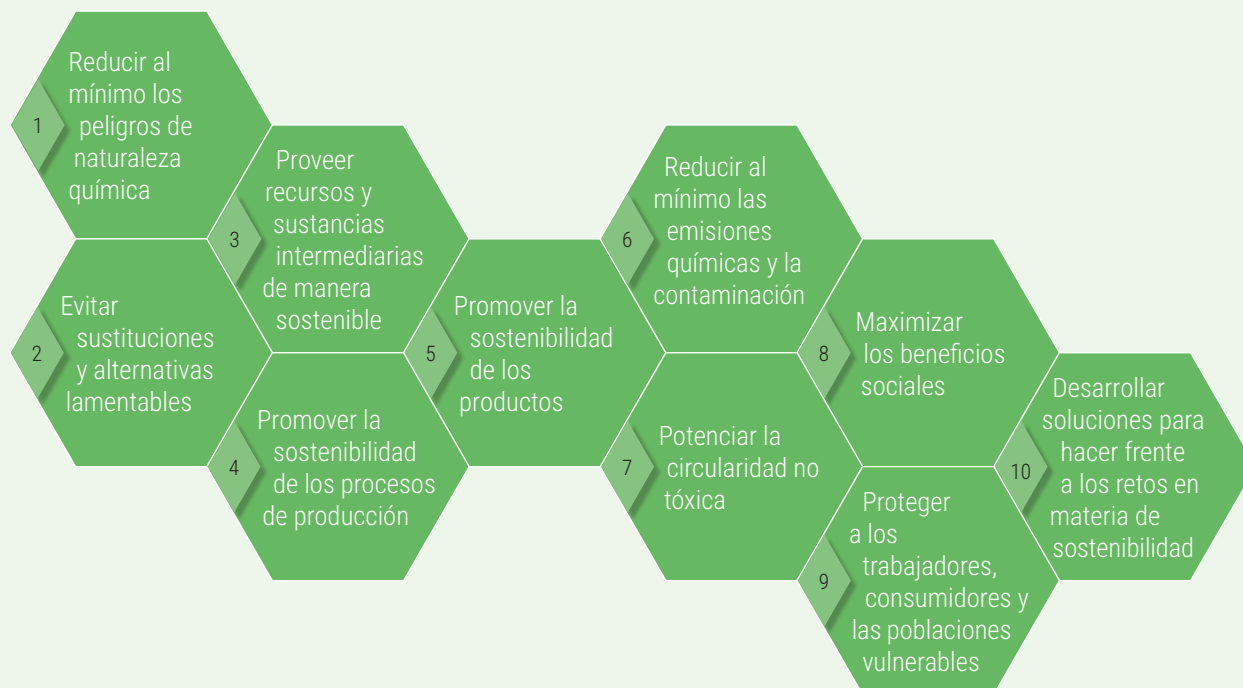
---

El Manual de referencia ofrece una visión general de alto nivel de una serie de aspectos científicos, técnicos y normativos en relación con la química verde y sostenible, dirigida a un público amplio. En él se examinan diversas facetas del tema con la intención de fomentar el aprendizaje general, la reflexión y la ampliación de la acción sobre la base de una comprensión global común del concepto. Los temas que en él se recogen han sido determinados tras una revisión de la literatura sobre química verde y sostenible, el informe del PNUMA de 2019 sobre las mejores prácticas en materia de química sostenible y la segunda edición del informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial. Con sujeción a la disponibilidad de recursos, el Manual de referencia se complementará con manuales específicos que abarcarán determinados temas de interés para los interesados. En 2021 se publicará un primer manual centrado en la formación en materia de química verde y sostenible.

El Manual también ofrece un marco que estructura y presenta los vínculos causales entre los distintos temas, que van desde los temas científicos hasta los instrumentos de facilitación. Un elemento importante del marco son los diez objetivos y consideraciones orientativas respecto de la química verde y sostenible que se presentan en el capítulo 3. Los objetivos complementan los enfoques tradicionales de la química, haciendo hincapié en las consideraciones de sostenibilidad y destacando los resultados que la química verde y sostenible se propone alcanzar. También proporcionan una orientación práctica para estimular la acción de los interesados a diversos niveles y en diferentes entornos. En última instancia, el objetivo busca promover la innovación que desvela todo el poder de la química, y es compatible con la implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y aboga por ella.

## Objetivos y consideraciones orientativas en relación con la química verde y sostenible

En el capítulo 3 del presente Manual se recogen diez objetivos relacionados con la química verde y sostenible y consideraciones orientativas para motivar a los interesados a reflexionar, evaluar y orientar sus acciones de innovación y sus prácticas de gestión. Se alienta a interesados y agentes a compartirlos en sus redes y a promocionar su amplia aplicación.



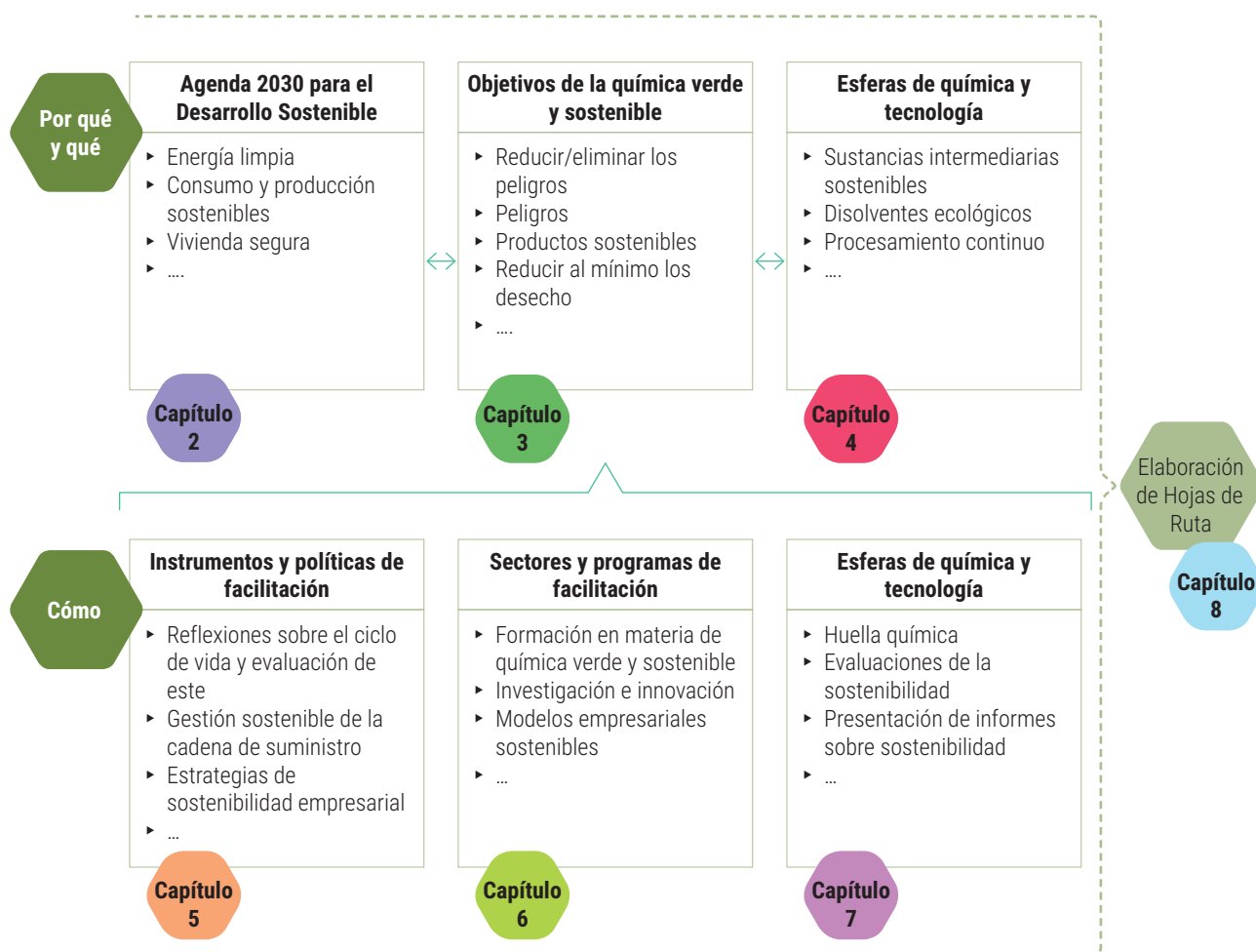
## Reseña del Manual de referencia

El Manual de referencia está estructurado en ocho capítulos. Tras esta introducción, en el capítulo 2 se analizan los retos y las oportunidades de la química en la consecución de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, que pretende avanzar en la satisfacción de las necesidades humanas dentro de los límites del planeta. Basándose, entre otras cosas, en las tendencias presentadas en el segundo informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial, el capítulo presenta una justificación respecto de la promoción de la química verde y sostenible y analiza los avances en pro de la promoción de esos conceptos.

El capítulo 3 presenta diez objetivos y consideraciones orientativas respecto de las acciones de los interesados dirigidas a aprovechar todo el potencial que ofrece la química verde y sostenible para la promoción del desarrollo sostenible en el siglo XXI. Las consideraciones y los objetivos están dirigidos a fundamentar las innovaciones ecológicas y sostenibles en la esfera química, pero también pueden ser pertinentes a la hora de evaluar las prácticas existentes en toda la cadena de valor de los productos químicos y los productos en general.

El capítulo 4 aborda las dimensiones científicas de la química verde y sostenible e introduce temas

Figura 1.1: Promover en la sostenibilidad a través de la química verde y sostenible



relevantes de la investigación y la innovación en química y tecnología. El capítulo 5 presenta las herramientas de gestión, los instrumentos y las políticas que pueden contribuir a promover la química verde y sostenible. El capítulo 6, estrechamente relacionado con el anterior, trata de los sectores y programas de facilitación pertinentes. En el capítulo 7 se examinan los parámetros y sistemas de presentación de informes pertinentes para el seguimiento de los progresos y la promoción de la química verde y sostenible. El capítulo 8 concluye con un llamamiento a los "agentes y artífices" para que elaboren hojas de ruta que ayuden a promover acciones en el ámbito de la química verde y sostenible en diferentes entornos (por ejemplo, multiplicando las buenas prácticas).

El Manual está estructurado en función de los elementos del marco conceptual con objeto de

promover la sostenibilidad a través de la química verde y sostenible, el cual se desarrolló mediante un proceso consultivo y se presenta a continuación (figura 1.1). Los capítulos 2, 3 y 4 abordan la cuestión de "por qué" es necesaria la química ecológica y sostenible y "qué" pretende conseguir, y en cuáles ámbitos específicos de innovación. Los capítulos 5, 6 y 7 se centran en las medidas de apoyo a la promoción de innovaciones en el ámbito de la química verde y sostenible (el "Cómo"). Estos elementos facilitadores de la acción van desde la promoción de los enfoques del ciclo de vida hasta el fortalecimiento de las políticas y programas de investigación e innovación. Un tema importante y transversal es la concienciación y la educación a todos los niveles que hacen llegar la agenda y el conocimiento de la química verde y sostenible a los posibles agentes, a través de la educación académica, no académica e informal.

## ¿A qué interesados se alienta a hacer uso de este Manual?

El presente Manual de referencia está dirigido a distintos públicos e interesados que se ocupan de la gestión racional de los productos químicos y los desechos, así como de la innovación en materia de química verde y sostenible y el desarrollo de productos sostenibles. Entre ellos se encuentran responsables de la adopción de decisiones y directivos de:

▼ **Autoridades públicas** responsables de regular los productos químicos de interés y promover

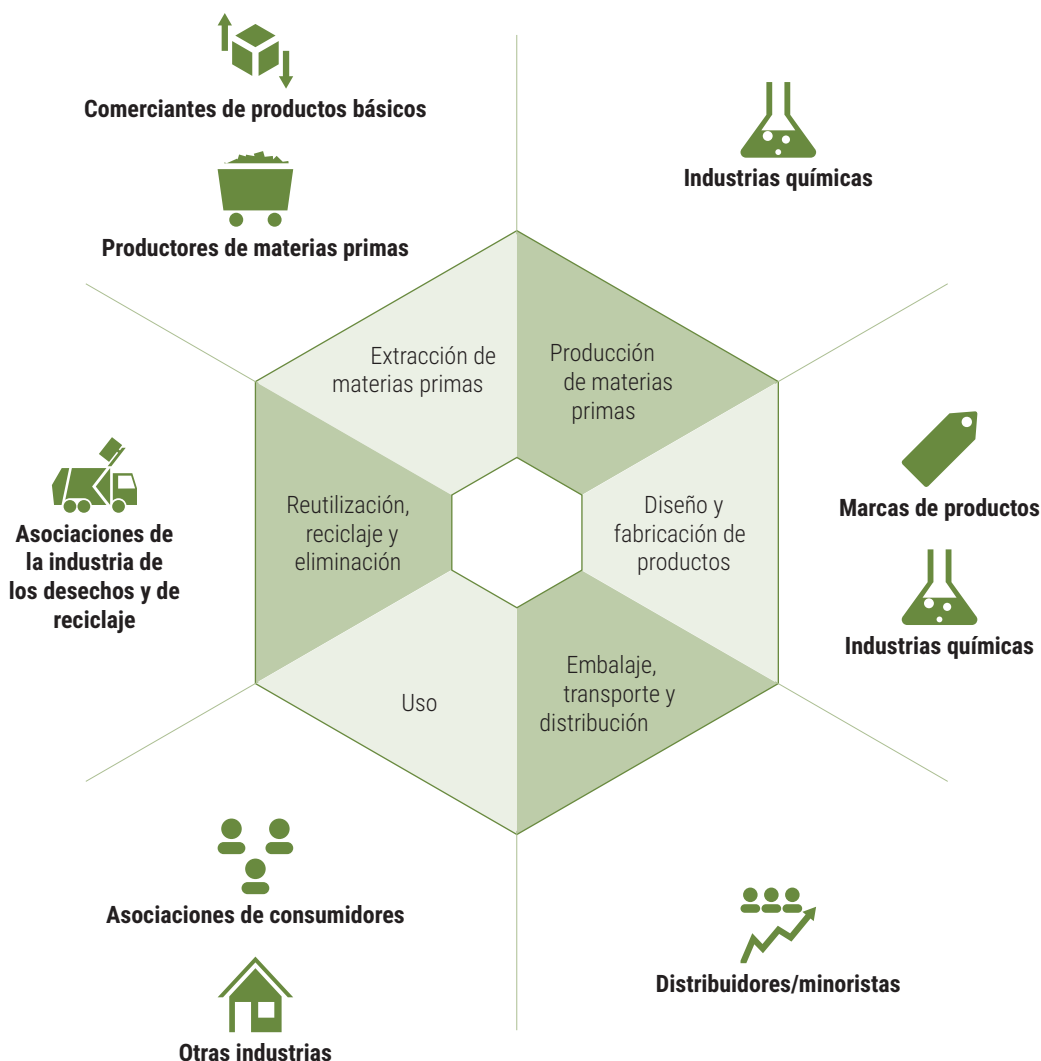
la innovación en materia de una química más segura y la sostenibilidad de los productos

▼ **Instituciones de enseñanza primaria, secundaria y terciaria** dedicadas a educar a la próxima generación de científicos del siglo XXI

▼ **Instituciones académicas y de investigación** que realizan investigación básica y aplicada en ámbitos como la química, la ingeniería de procesos y el diseño de productos

▼ **Entidades del sector privado** que participan en todas las fases de la cadena de valor, desde el

Figura 1.2: Agentes del sector privado en la cadena de valor y el ciclo de vida del producto





abastecimiento de materias primas y sustancias intermediarias, hasta el diseño de productos, la producción, el reciclaje y la eliminación

- ▼ **Consumidores** que pueden con su elección moldear la demanda del mercado hacia productos más seguros y sostenibles
- ▼ **Organizaciones de la sociedad civil** que participan en la promoción de la gestión racional de los productos químicos y los desechos por parte de los agentes públicos y privados y los consumidores
- ▼ **Organizaciones laborales** que buscan proteger a los trabajadores de los productos químicos peligrosos
- ▼ **Ciudadanos y público en general** que aspiran a estilos de vida y sociedades más sostenibles

## Alentar la acción del sector privado en toda la cadena de valor

Un importante grupo de interesados al que el Manual pretende llegar y estimular son las **entidades del sector privado**. Los distintos actores representados en la figura 1.2 tienen diferentes funciones que desempeñar en la promoción de la química verde y sostenible durante las distintas etapas de la cadena de valor de los productos químicos y los productos en general. La lista de la figura 3.2 –si bien no es exhaustiva– pretende presentar a los principales actores implicados. Una medida práctica que se anima a emprender a los agentes del sector privado es difundir ampliamente y utilizar los 10 objetivos y las consideraciones orientativas presentadas en el capítulo 3 para evaluar y orientar sus programas de innovación y evaluar las prácticas de gestión actuales.

## Participación de los interesados en la preparación del Manual

---

Durante una sesión técnica informativa que tuvo lugar durante la tercera reunión entre períodos de sesiones sobre la gestión de productos químicos y desechos de 2020, celebrada en septiembre de 2019 en Bangkok (Tailandia) se pasó revista al bosquejo inicial del Manual de referencia. En un taller mundial que tuvo lugar los días 5 y 6 de diciembre de 2019 en Ginebra (Suiza) se celebraron exhaustivos debates al respecto. A principios de 2020 se publicó una versión revisada de las anotaciones al bosquejo del Manual, en la cual se

tomaron en cuenta las observaciones y perspectivas aportadas por los participantes en el taller. En una reunión virtual de expertos celebrada el 22 de junio de 2020 se revisó un primer borrador del Manual de referencia. En la elaboración de un proyecto revisado se han tenido en cuenta las aportaciones recibidas en la reunión y las observaciones por escrito aportadas por expertos. Durante el cuarto trimestre de 2020 se llevó a cabo un proceso de consulta final.



# 2





# LA QUÍMICA Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE: **RETOS Y OPORTUNIDADES** >

- 2.1 ¿Por qué es necesaria una acción  
sistémica para promover la  
química verde y sostenible? 10
- 2.2 Evolución de la comprensión  
general respecto de los conceptos  
de química verde y sostenible 19

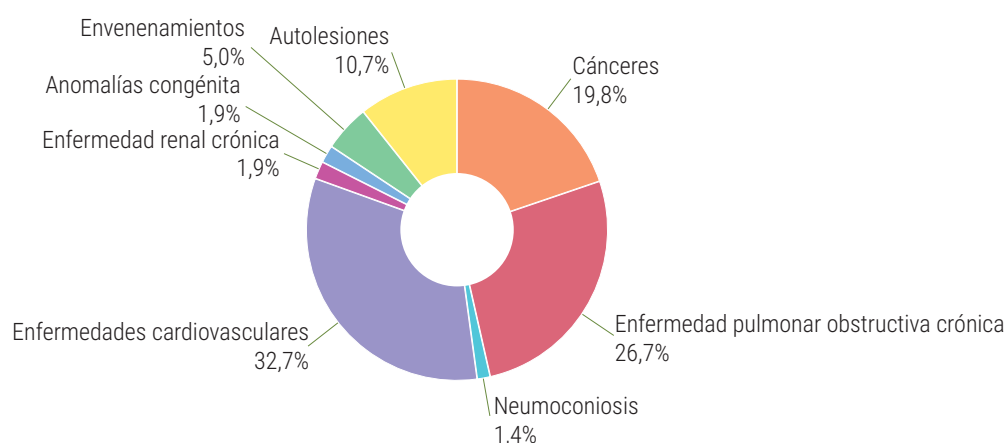
## 2.1 ¿Por qué es necesaria una acción sistémica para promover la química verde y sostenible?

En las secciones que figuran a continuación se toman como referencia, se explican detalladamente y se caracterizan algunas de las tendencias, novedades y cifras recogidas en el segundo informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial, recientemente publicado.

### Las tendencias mundiales suscitan gran preocupación

El segundo informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial, si bien reconoce que muchos productos químicos son importantes para el desarrollo sostenible, presenta una serie de tendencias que son que suscitan preocupación desde el punto de vista de la salud humana, el medio ambiente y la sostenibilidad. El informe aporta pruebas de que el número de productos químicos es cada vez mayor, y de que los productos químicos peligrosos y otros contaminantes siguen siendo liberados en ambientes interiores y exteriores, por ejemplo como desechos, en grandes cantidades, afectando a personas y comunidades de todo el mundo. Actualmente los productos químicos sintéticos son omnipresentes en los seres humanos y el medio ambiente, y la contaminación química se ha convertido en una de las principales causas de enfermedades humanas y muertes prematuras. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó la carga de la enfermedad ocasionada por determinados productos químicos en 1,6 millones de vidas perdidas y 44,8 millones de años de vida ajustados en función de la discapacidad en 2016 (WHO 2018a), cifras que podrían estar subestimadas. Los trabajadores, las

Figura 2.1: **Muertes (total: 1,6 millones) atribuidas a productos químicos específicos (expresas en porcentaje) 2016** (adaptado de WHO 2018a, p. 2)





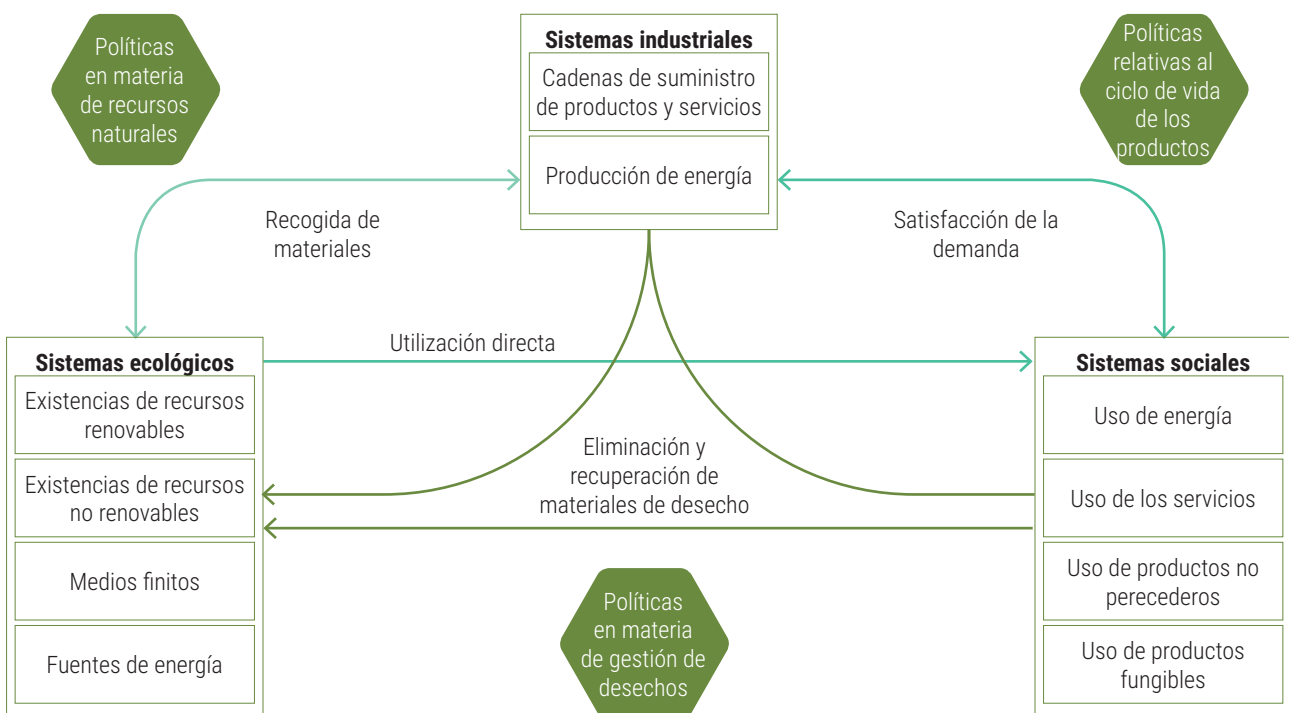
mujeres y los niños están especialmente en riesgo (UNEP 2019b). Además, los productos químicos se acumulan en cantidades significativas en las existencias de materiales y productos, lo que crea pasivos potenciales de cara al futuro.

En sus conclusiones el informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial afirma que no se alcanzará la meta mundial de reducir al mínimo los efectos adversos de los productos químicos y los desechos en 2020. Se requiere una acción mundial más ambiciosa y urgente por parte de todos los interesados y seguir como hasta ahora no es una opción. Como parte de los esfuerzos por fortalecer las acciones necesarias se deberían incluir medidas inmediatas dirigidas a minimizar los impactos adversos de los productos químicos existentes, por ejemplo, mediante prohibiciones y restricciones. Más allá de estas medidas, la verdadera oportunidad del siglo XXI reside en acelerar las innovaciones químicas más verdes y sostenibles. Ello puede lograrse ampliando los programas de innovación y desarrollando y comercializando cadenas de suministro y de valor más sostenibles para los productos químicos y los productos en general que abarquen todo el ciclo de vida.

### Corrientes mundiales de materiales y productos y su dimensión química

Desde el año 2000, la capacidad de producción mundial de la industria química casi se ha duplicado, pasando de unos 1.200 a 2.300 millones de toneladas. Las ventas mundiales de productos químicos ascendieron a 5,68 billones de dólares de los Estados Unidos en 2017 y se prevé que casi se dupliquen para 2030. Cabe destacar que el crecimiento fue más rápido en las economías emergentes y en desarrollo, impulsado por la industrialización, la urbanización y el aumento de los sectores industriales de uso intensivo de productos químicos, como la construcción, la agricultura y el procesamiento de alimentos, y la electrónica (UNEP 2019b). El crecimiento previsto crea oportunidades, pero también riesgos, dados los peligros y riesgos que plantean muchos productos químicos existentes en el mercado y la falta de marcos adecuados de gestión de productos químicos en muchos países. En el segundo informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial se considera que esta evolución, impulsada por el aumento de los niveles de consumo, es insostenible y crea vulnerabilidades a nivel local y a lo largo de las cadenas de suministro. La fabricación

Figura 2.2: **Concepto sistémico de los ciclos de las corrientes de materiales** (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD] 2010, p. 21)



avanzada basada en la innovación de la química verde y sostenible ofrece opciones novedosas en el siglo XXI para ayudar a conseguir un consumo y una producción sostenibles e innovaciones relacionadas con los productos, así como una relación más equilibrada con la Tierra.

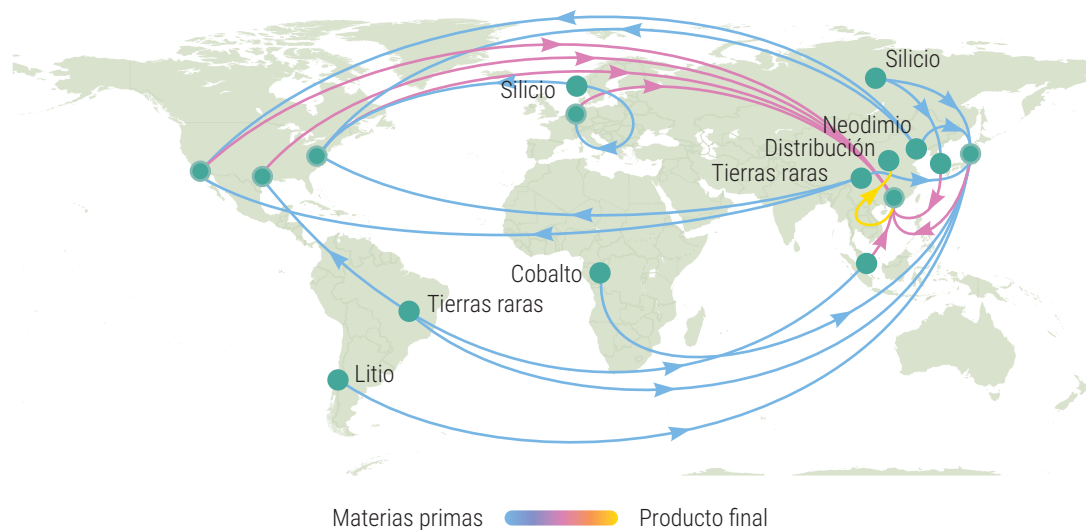
La industria química desempeña un papel fundamental a la hora de convertir las sustancias intermediarias en productos y servicios, y los materiales fluyen a través de los *sistemas ecológicos*, industriales y sociales. La química es también la principal ciencia que crea las nuevas moléculas y materiales necesarios para alcanzar una serie de ODS. Según la OCDE (2010), los sistemas ecológicos proporcionan el capital natural del que se extraen o derivan los materiales. Incluyen las reservas de recursos renovables, como los bosques, las reservas de recursos no renovables (por ejemplo, el petróleo, los metales), los medios ambientales (es decir, el aire, el agua y la tierra) y las fuentes físicas de energía renovable (por ejemplo, la energía solar, geotérmica, eólica y de las mareas). Los *sistemas industriales* utilizan los servicios de los ecosistemas y obtienen materiales del capital natural, convirtiéndolos en un producto o servicio acabado que tiene un precio. Algunos materiales terminan como existencias dentro de las infraestructuras, como los edificios. Por último, los *sistemas sociales* consumen productos, servicios y energía suministrados por los sistemas

industriales y generan desechos que pueden ser reciclados de nuevo en los sistemas industriales o se depositan en el *sistema ecológico*. Los *sistemas sociales* muchos también consumen directamente los servicios de los ecosistemas y las reservas de recursos, como el agua (OECD 2010).

### Complejas cadenas de suministro mundiales y ciclos de vida de los productos

La complejidad de las cadenas de suministro que se extienden por todo el mundo, unidas a las limitaciones en materia de información acerca de las sustancias químicas en la producción y los productos, hacen que los fabricantes de productos y los minoristas tengan dificultades para saber qué sustancias químicas se liberan a lo largo del ciclo de vida del producto y en qué cantidades. Estas limitaciones suponen un reto a la hora de tomar medidas a lo largo del ciclo de vida del producto, como por ejemplo minimizar las emisiones químicas en la producción y la exposición de los trabajadores durante la fabricación; reducir la exposición de los consumidores; y reducir las emisiones químicas durante el reciclaje y la eliminación. Estas lagunas de conocimiento también generan incertidumbres en los inversores. La cadena de suministro de un producto electrónico que se muestra a continuación ilustra las complejidades de las cadenas de

Figura 2.3: Complejidad de las cadenas mundiales de suministro: el caso de un producto electrónico (adaptado de Sourcemap 2012)



suministro mundiales en un sector económico específico y en distintas ubicaciones geográficas.

### Múltiples dimensiones de la empresa química que afectan a la sostenibilidad

La empresa química –ya sea una instalación individual, una marca o la industria en su conjunto– tiene muchas dimensiones interconectadas que afectan a la sostenibilidad. Entre las principales esferas cabe citar, por ejemplo, el abastecimiento de materias primas y sustancias intermediarias sostenibles, el uso del agua y la energía, el diseño orientado a la función, el uso y la reutilización, los sistemas de gestión de la seguridad a lo largo de la cadena de suministro mundial, etc. La figura 2.4 ofrece una visión general de las principales esferas (Hill, Kumar and Verma 2013). Para evaluar la sostenibilidad de la industria química, por tanto, se precisa algo más que una mera evaluación de los peligros y riesgos que plantean los productos químicos y los procesos de producción.

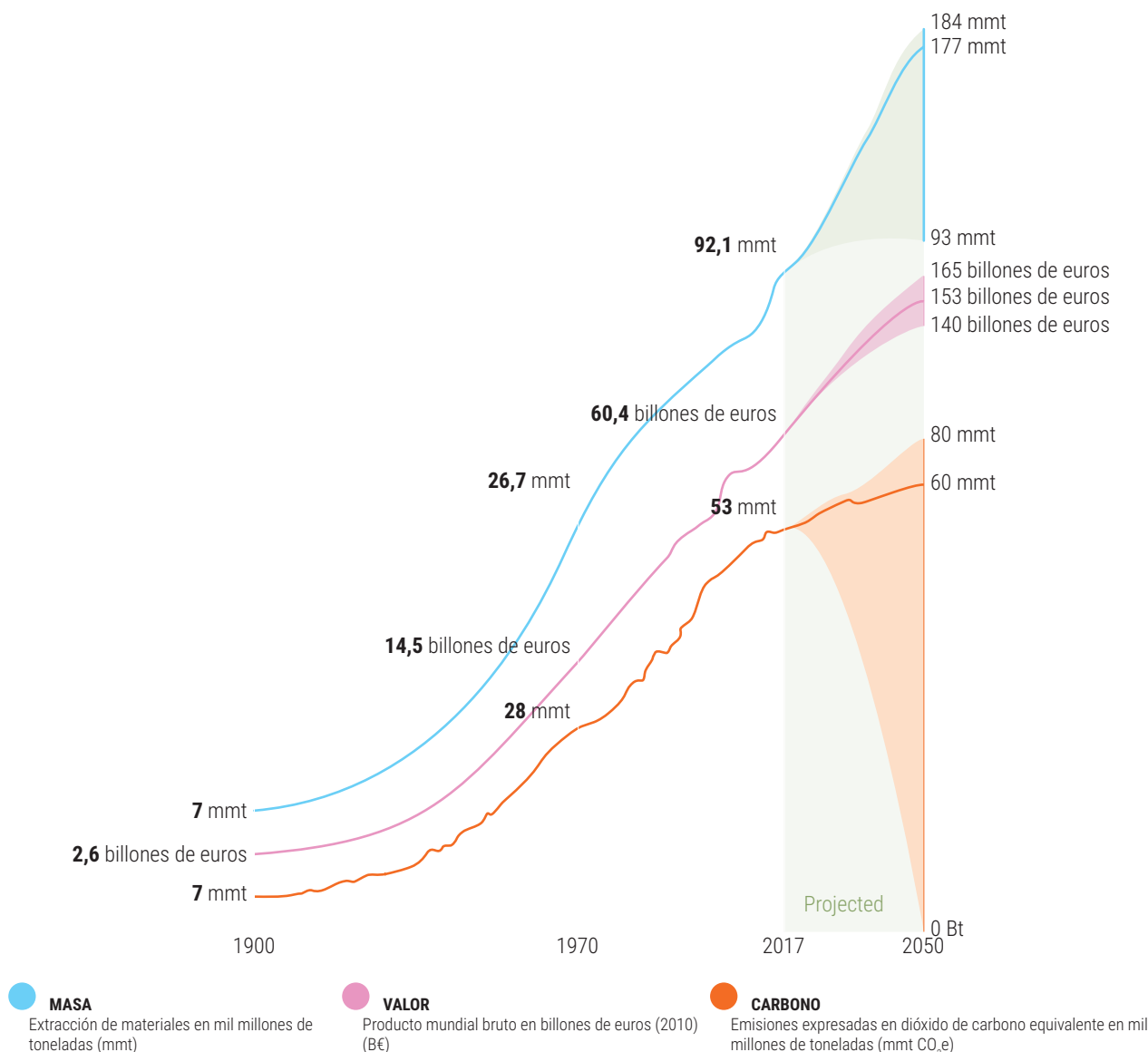
Otra cuestión importante es cómo abordar las posibles compensaciones entre las distintas esferas, por ejemplo, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> utilizando materiales compuestos que pueden no ser reciclables, o el uso de metales pesados tóxicos en dispositivos utilizados para generar energía renovable. Las posibles compensaciones también se extienden a las dimensiones sociales. Un producto químico más benigno puede, por ejemplo, producirse en malas condiciones laborales, o utilizar minerales conflictivos como recurso. Para este tipo de cuestiones, el uso de herramientas como el ciclo de vida o las evaluaciones sociales puede aportar información valiosa (véase el capítulo 5).

Si bien los debates en torno a la química verde y sostenible suelen centrarse en las propiedades intrínsecas de los productos químicos, los procesos y los productos (es decir, en tratar de minimizar sus propiedades y su potencial de peligro), las consideraciones más amplias a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos químicos y los productos (por ejemplo, las opciones extrínsecas de fabricación) también son pertinentes en el contexto

Figura 2.4: Dimensiones de una empresa química: hacia la sostenibilidad (adaptado de Hill, Kumar and Verma 2013, p. 27)



Figura 2.5: **Tendencias en la extracción de materiales, la creación de valor financiero y las emisiones de gases de efecto invernadero (1900-2050)** (adaptado de Wit *et al.* 2019, p. 11)



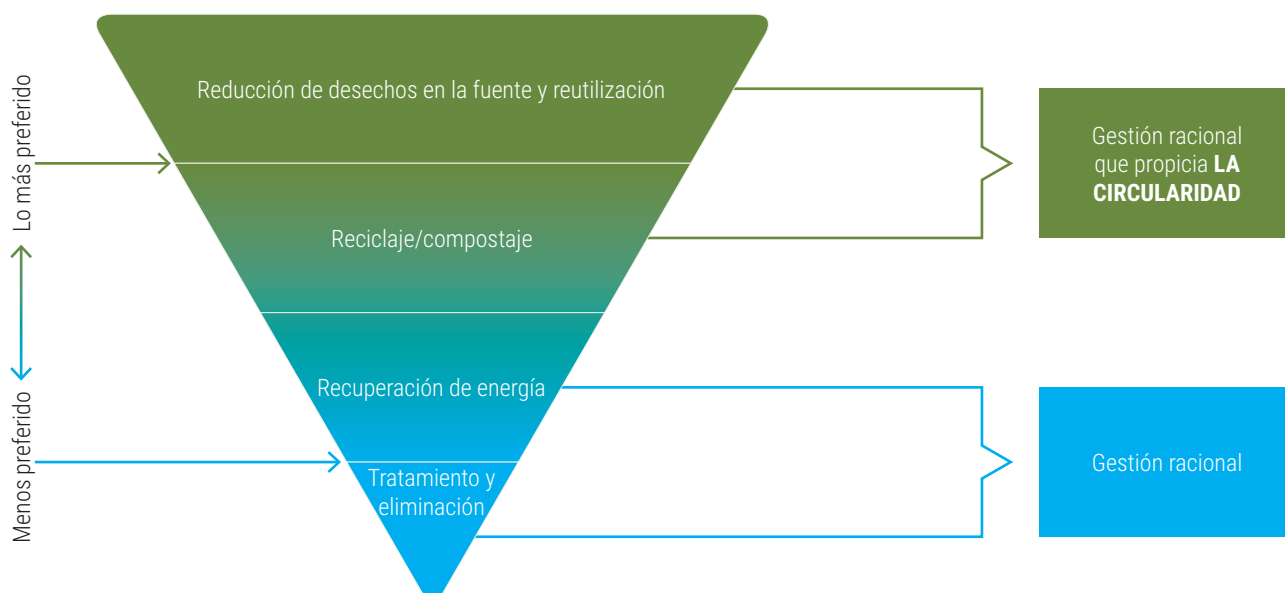
de la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Por ejemplo, los productos químicos no peligrosos diseñados según los principios de la química verde pueden no apoyar necesariamente criterios más amplios de sostenibilidad, por ejemplo, si se utilizan en la fabricación de productos no sostenibles (por ejemplo, los que contribuyen al cambio climático).

### Retos en materia de sostenibilidad asociados a los materiales, productos y corrientes de desechos

Según datos recogidos en el informe Global Resources Outlook 2019 (Oberle *et al.* 2019) del Panel Internacional de Recursos en 2017 se extrajeron aproximadamente 92.000 millones de toneladas de materiales en todo el mundo. Según previsiones del informe la extracción alcanzará los 190.000 millones de toneladas en 2060 y se destaca que actualmente se recicla menos del 10 % de los recursos extraídos. La magnitud de las corrientes de recursos materiales del sector químico es una



Figura 2.6: **La jerarquía en la gestión de desechos: posible impulsor de la gestión sostenible de los materiales y de la economía circular** (adaptado de United States Environmental Protection Agency [US EPA] 2017)



dimensión importante de las corrientes mundiales de materiales. En 2015, casi 1.700 millones de toneladas de sustancias intermediarias y reactivos secundarios generaron unos 820 millones de toneladas métricas (mtm) de productos químicos, generando también casi la misma cantidad de subproductos (por ejemplo, disolventes orgánicos). Los procesos de producción asociados con estas corrientes de materiales siguen liberando emisiones considerables de sustancias químicas en el aire, el agua y el suelo, así como grandes cantidades de desechos, incluidos los desechos peligrosos. En la fabricación de productos farmacéuticos, por ejemplo, se generan al menos 25 kilogramos (kg) de emisiones y desechos (y, a veces, más de 100 kg) por cada kg de producto, lo que pone de manifiesto la ineficiencia del uso de los recursos (Sheldon 2017).

Muchos artículos y productos del mercado contienen cientos de sustancias o productos químicos con propiedades peligrosas, lo que genera preocupación debido a sus emisiones y liberaciones y a sus posibles efectos sobre la salud o el medio ambiente. Entre los ejemplos citados en el segundo informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial se incluyen el formaldehído en el champú, las microperlas en la pasta de dientes o las lociones, los ftalatos en los

envases de alimentos, ciertos piroretardantes en televisores y los antimicrobianos (por ejemplo, el triclosán) en jabones. La contaminación química de los productos también puede impedir el uso circular de los materiales y el cumplimiento de los principios de la jerarquía de residuos, que hacen hincapié, por orden de prioridad, en la reducción en origen, la reutilización y el reciclaje. Las innovaciones en materia de química verde y sostenible tienen el potencial de ayudar a lograr estos principios.

### Satisfacer las necesidades humanas fundamentales, protegiendo al mismo tiempo el medio ambiente y la salud humana

La creciente carga de la contaminación y los desechos químicos y el continuo crecimiento de la industria química (y la incapacidad de gestionar plenamente los ciclos de vida de los productos de forma sostenible) son cuestiones interconectadas que se relacionan con las modalidades de consumo de una población en constante crecimiento que utiliza más materiales a medida que aumenta la riqueza. En el centro de esta cuestión está la necesidad de evaluar cómo satisfacer las necesidades humanas fundamentales y proteger el medio ambiente y la salud humana. Reconocer

esto puede ser un paso importante para promover un consumo y una producción más sostenibles y opciones de estilo de vida. El reto es explorar y promover un sistema en el que el conocimiento y el uso de la química verde y sostenible puedan servir a las necesidades humanas de una manera más intencionada y sostenible.

## La química y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible fue adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015. La Agenda 2030 hace hincapié en que el desarrollo ha de ser compatible con las tres dimensiones de la sostenibilidad: la económica, la social y la ambiental. El desarrollo sostenible es integrado e indivisible, lo que significa que debe aplicarse como un todo, y no a través de silos fragmentados. Al mismo tiempo, la reciente pandemia de COVID-19 está demostrando lo frágiles que son nuestros sistemas globales, sobre todo las cadenas de suministro, lo que plantea la cuestión de cómo ampliar la sostenibilidad con consideraciones de resiliencia. La figura 2.7 ilustra las tres dimensiones del desarrollo sostenible como tres sistemas interdependientes en los que

la biosfera sirve de base para el desarrollo de las sociedades y las economías.

La gestión racional de los productos químicos y los desechos forma parte de los 17 ODS y guarda relación con todos ellos ya que proporciona orientación respecto de la química verde y sostenible y sirve de concepto universal. Las metas 12.4 y 3.9 de los ODS revisten importancia directa para una serie de cuestiones relacionadas con la gestión de productos químicos y desechos. De una importancia relevante es el ODS 9 que fomenta la elaboración de infraestructura fuerte, inclusivo y sostenible industrialización e innovación para generar empleo y ganancias. Otros ODS precisan de nociones de química más seguras, por ejemplo, la meta 6.3 de los ODS sobre la mejora de la calidad del agua. Por último, algunos ODS y metas tienen una relevancia directa para los sectores de uso intensivo de sustancias químicas, por ejemplo, el acceso a los alimentos, la energía limpia y la vivienda segura. Todos los ODS y las metas tienen en común el hecho de que no es posible su consecución sin una gestión racional de los productos químicos y los desechos y sin innovaciones sostenibles en el ámbito de la química. Así pues, estos ODS sirven de poderosa referencia y allanan el camino para avanzar en la agenda de la química verde y sostenible.

Figura 2.7: Las tres dimensiones de la sostenibilidad (adaptado de Stockholm Resilience Centre 2016)

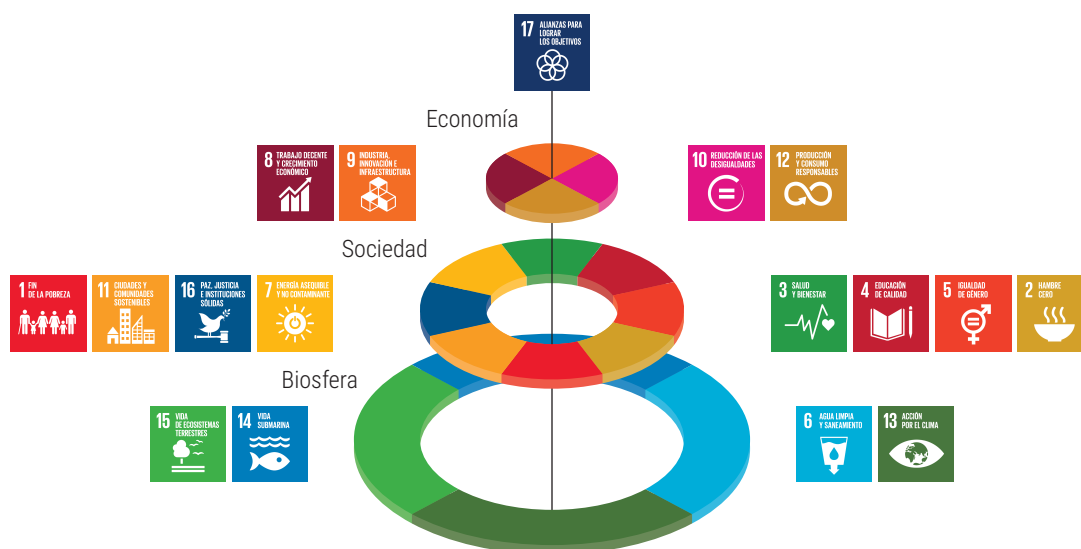
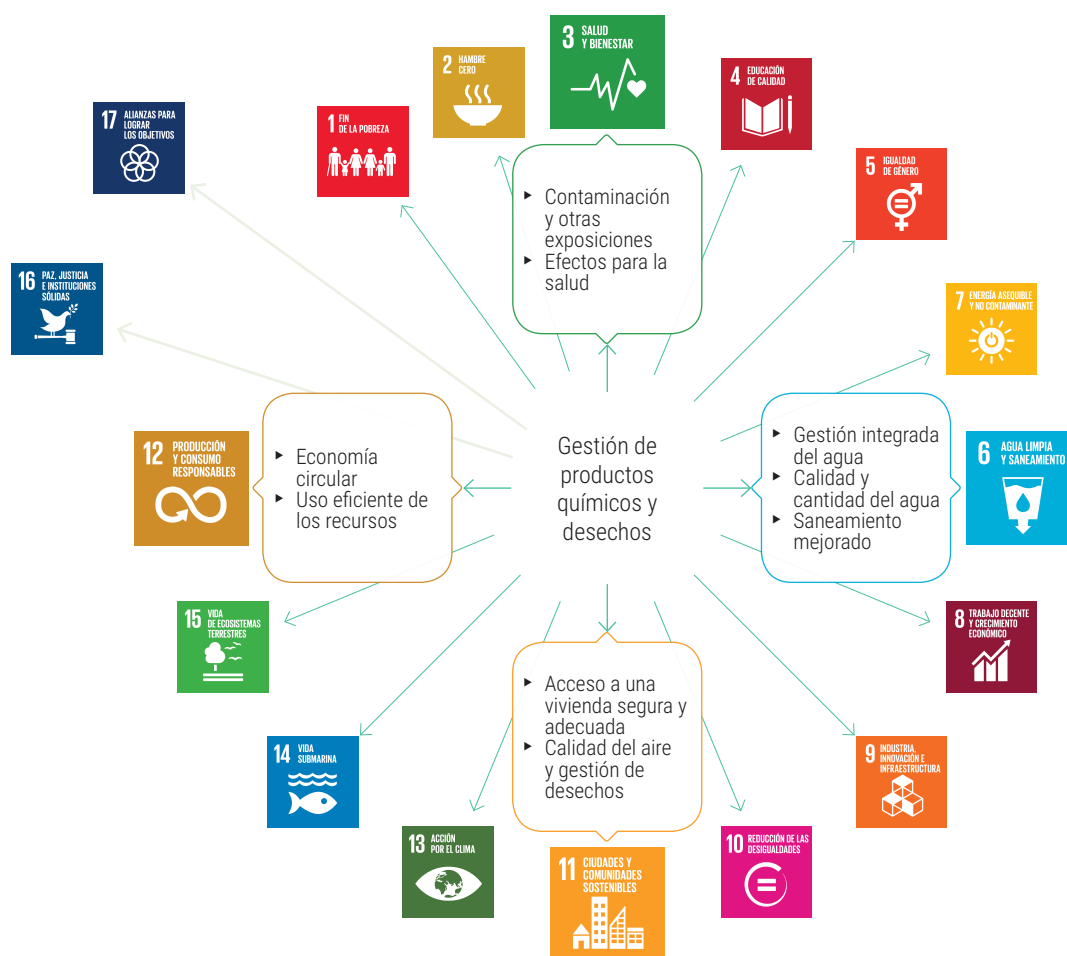


Figura 2.8: Vínculos entre los productos químicos y los desechos y los ODS (adaptado de IOMC 2018, p. 3)










### Garantizar que las innovaciones cumplan los criterios de sostenibilidad

Las recientes innovaciones en química y materiales avanzados han creado nuevas oportunidades en toda la cadena de valor para promover la sostenibilidad. Entre ellas, por ejemplo: revolucionar el almacenamiento de energía y el desarrollo de baterías; crear materiales de construcción sostenibles; mejorar la reciclabilidad y biodegradabilidad de una serie de productos; o convertir el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y los desechos en sustancias intermediarias químicas. La innovación más ecológica y sostenible en la

interfaz de la química, la biología y la informática es especialmente prometedora (UNEP 2019b).

Para garantizar que las innovaciones químicas sean plenamente compatibles con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, es esencial desarrollar y utilizar criterios de sostenibilidad sólidos para evaluar innovaciones específicas. La aplicación sistemática de estos criterios ayudaría a aprovechar todo el potencial de la química para promover la sostenibilidad y contribuiría a la consecución del ODS 12 sobre consumo y producción sostenibles, así como de otros ODS y metas (véase el cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1: Algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas relevantes para la química verde y sostenible (adaptado de UNEP 2019b, p. 644)**

Sectores	Metas de los ODS	Ejemplos de oportunidades para la gestión y la innovación
Agricultura y alimentos	 Meta 2.4: producción sostenible de alimentos	Ampliar la gestión integrada de plagas y los enfoques agroecológicos, con inclusión del desarrollo y el uso de alternativas no químicas y otras buenas prácticas agrícolas
Salud	 Meta 3.8: medicamentos y vacunas seguros	Manejo racional de productos farmacéuticos y desinfectantes que contribuyen a la resistencia a los antimicrobianos
Energía	 Meta 7.a: investigación y tecnología relativas a la energía limpia	Mejorar las tecnologías utilizando materiales sostenibles y eficientes en el uso de recursos en la descarbonización del sector energético
Infraestructura	 Objetivo 9.1: infraestructuras sostenibles	Reducir el uso de materias primas y la generación de desechos a través del uso de materiales avanzados sin crear legados futuros
Industria	 Meta 9.2: industrialización sostenible	Velar por que los sectores de la industria que hacen un uso intensivo de productos químicos se guíen por las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales
Vivienda	 Meta 11.1: viviendas seguras	Reducir la contaminación del aire en locales cerrados por medio de aislamientos más seguros y reemplazar los materiales de construcción que revisten preocupación (por ejemplo, el amianto)
Transporte	 Meta 11.2: sistemas de transporte sostenible	Promover modalidades de movilidad no contaminante, por ejemplo, basándose en soluciones químicas sostenibles para las baterías
Turismo	 Meta 8.9: turismo sostenible	Adoptar prácticas para reducir la huella química de los servicios turísticos
Minería	 Meta 12.2: uso sostenible de los recursos naturales	Al mismo tiempo que se garantiza una buena gestión de los residuos mineros, estos se reutilizan y se devuelven a la economía en la medida de lo posible
Trabajo	 Meta 8.8: entornos de trabajo seguros	Mejorar la evaluación del riesgo de los productos químicos que suscitan preocupación y promover la inversión en química verde y sostenible para reducir la exposición peligrosa en el lugar de trabajo
Educación	 Meta 4.7: educación para el desarrollo sostenible	Incorporar la química verde y sostenible en los planes de estudio pertinentes
Finanzas	 Meta 17.3: recursos financieros de múltiples fuentes	Mejorar el uso de indicadores de química verde y sostenible como criterios para la inversión



## 2.2 Evolución de la comprensión general respecto de los conceptos de química verde y sostenible

### Química verde: un elemento esencial para la química sostenible

El término “química verde” se utilizó por primera vez a principios de los años 90. En su momento, cobró impulso tras recibir el reconocimiento y el apoyo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Linthorst 2010), el cual incluyó la mejora de los intercambios de información entre el sector público y el privado, el fomento de las innovaciones, la creación de visibilidad (premios anuales) y la creación de redes para comercializar

productos innovadores. En una evolución similar en Europa, se incluyeron consideraciones compatibles con la “química verde” en la Directiva del Consejo relativa a la Prevención y el Control Integrados de la Contaminación (European Commission [EC] 1996). El informe del Consejo de Química de las Comunidades Europeas de 1993, titulado “Chemistry for a Clean World”, así como las conferencias relativas al concepto relativo al diseño intencionadamente benigno (Linthorst 2010) fueron también decisivos. Entre otros conceptos conexos desarrollados en ese momento cabe

#### Recuadro 2.1: Doce principios de la química verde (Anastas and Warner 1998)

1. **Prevención:** es mejor evitar la generación de desechos que tratarlos o eliminarlos una vez creados.
2. **Economía del átomo:** los métodos sintéticos deberían diseñarse para maximizar la incorporación en el producto final de todos los materiales iniciales utilizados en el proceso.
3. **Síntesis químicas menos peligrosas:** siempre que sea posible, los métodos de síntesis deberían estar diseñados de manera que utilicen y generen sustancias que posean poca o ninguna toxicidad para la salud humana y el medio ambiente.
4. **Diseñar productos químicos más seguros:** los productos químicos deberían diseñarse para que cumplan la función deseada con un mínimo de toxicidad.
5. **Disolventes y sustancias auxiliares más seguros:** siempre que sea posible debería evitarse el uso de sustancias auxiliares (por ejemplo, disolventes, agentes de separación) y, en caso de que sea preciso utilizarlos, deberían ser inocuos.
6. **Diseño para la eficiencia energética:** las necesidades energéticas de los procesos químicos deberían ser reconocidas por su impacto ambiental y económico y se deberían reducir al mínimo, de ser posible, los métodos sintéticos deberían utilizarse a temperatura y presión ambiente.
7. **Utilización de sustancias intermediarias renovables:** las materias primas o sustancias intermediarias deberían ser renovables en lugar de agotarse siempre que sea técnica y económicamente viable.
8. **Reducir los derivados:** la derivatización innecesaria (uso de grupos de productos para bloqueo, protección/desprotección, modificación temporal de los procesos físicos/químicos) debería reducirse al mínimo –o evitarse si es posible– ya que precisan el uso de reactivos adicionales y pueden generar desechos.
9. **Catálisis:** utilizar catalizadores (lo más selectivos posible) mejor que reactivos estequiométricos.
10. **Diseñados para degradarse:** los productos químicos deberían diseñarse de manera que una vez cumplida su función se descompongan en productos de degradación inocuos y no persistan en el medio ambiente.
11. **Análisis en tiempo real para evitar la contaminación:** es necesario seguir desarrollando metodologías analíticas que permitan el seguimiento y el control en tiempo real durante el proceso antes de la formación de sustancias peligrosas.
12. **Química intrínsecamente más segura para la prevención de accidentes:** las sustancias y los distintos estados de una sustancia utilizados en un proceso químico deberían elegirse de manera tal que se reduzca al mínimo la probabilidad de accidentes químicos, incluidas las emisiones, las explosiones y los incendios.

mencionar el concepto de producción más limpia, de productos más seguros y de uso de materias primas renovables (Clark 2006; Mubofu 2016).

En 1998, Anastas y Warner definieron la química verde como la utilización de un conjunto de principios para reducir o eliminar el uso o la generación de sustancias peligrosas en el diseño, la fabricación y la aplicación de productos químicos y elaboraron los 12 Principios de la Química Verde (Anastas and Warner 1998) (cita traducida). En 2003, los 12 Principios de la Química Verde se complementaron con 12 Principios de la Ingeniería Verde (Anastas and Zimmerman 2003). La Sociedad Americana de Química (ACS) ofrece una breve explicación de cada uno de los 12 principios de la Química Verde, así como orientaciones para elaborar una sustancia química o una reacción más ecológica (ACS 2020a). Entretanto, muchos países en todo el mundo han comenzado a establecer redes de química verde y dado a conocer su posición en cuanto a las políticas respecto de la química verde.

### Química: la base molecular del desarrollo sostenible

Los químicos son arquitectos moleculares; diseñan moléculas que proporcionan la base de materiales y bienes para satisfacer las necesidades

y demandas de los seres humanos. Sin embargo, una sociedad sostenible depende de que los productos y procesos químicos estén diseñados para favorecer la vida (Zimmerman *et al.* 2020) y no supongan una amenaza potencial para la salud de los seres humanos y los ecosistemas a corto y largo plazos. Los 12 principios de la química verde y los 12 principios de la ingeniería verde, por lo tanto, plantean a los químicos y otros científicos el reto de examinar las propiedades inherentes de las moléculas químicas en la fase de diseño. El término diseño sugiere que esta tarea tiene un propósito y es intencional (Anastas and Zimmerman 2016); ayuda a evaluar en una fase temprana del diseño si los compuestos y procesos tienen, por ejemplo, la capacidad de agotar en lugar de ser renovables, son tóxicos en lugar de benignos, y persistentes en vez de ser fácilmente degradables (Zimmerman *et al.* 2020).

Un aspecto importante de la química verde es el diseño de productos químicos y procesos más benignos que imiten a la naturaleza y que tengan lugar en las condiciones que esta ofrece, es decir, que no requieran calor ni alta presión para catalizar las reacciones. Por ejemplo, a diferencia de las reacciones de sustitución con haluros orgánicos reactivos utilizadas tradicionalmente en la química industrial, la naturaleza a menudo utiliza la contorsión geométrica para producir reactividad en

Cuadro 2.2: De las tecnologías tradicionales a las de la química verde y biomimética (Van Hamelen 2018, p. 6)

Tradicional	Verde y biomimética
<ul style="list-style-type: none"><li>▶ Calentar, batir, probar: reacciones químicas a alta temperatura, alta presión y tratamiento químico</li><li>▶ Disolventes orgánicos</li><li>▶ Sustancias intermediarias fósiles y energía fósil</li><li>▶ Es imprescindible que las sustancias intermediarias tengan una alta pureza</li><li>▶ Utilización de todo el sistema periódico</li><li>▶ Recursos obtenidos en todo el mundo</li><li>▶ Controlar el riesgo mediante la adopción de precauciones de seguridad</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▶ Las reacciones químicas tienen lugar a temperatura y presión ambiente</li><li>▶ Agua como disolvente</li><li>▶ Reacciones químicas de baja energía</li><li>▶ Sustancias intermediarias primas locales procedentes de fuentes diversas</li><li>▶ La degradación forma parte del diseño: degradación programada de la inestabilidad ocasionada (John Warner), Procesos de desmontaje de la naturaleza (Janine Benyus)</li><li>▶ La funcionalidad la crea la estructura, no el material en sí</li><li>▶ Los sistemas vivos solo utilizan 25 elementos; el carbono, el oxígeno y el sodio constituyen el 96 % de los átomos de los sistemas vivos; otros elementos se utilizan en cantidades mínimas</li><li>▶ Controlar el riesgo aprovechando las propiedades inherentes de los materiales</li></ul>

sustratos que de otro modo no serían reactivos, con especificidad y selectividad, y con poca o ninguna generación de residuos (Anastas and Zimmerman 2016). El cuadro 2.2 ofrece algunos ejemplos de cómo los enfoques de la química verde ayudan a pasar de las tecnologías tradicionales a las de química verde y biomimética.

La investigación en línea con los principios de la química verde ha hecho posible múltiples avances novedosos en los campos del diseño de productos químicos y formulaciones menos tóxicas, productos químicos de base biológica, sustancias intermediarias renovables, disolventes y reactivos más seguros/menos tóxicos, economía del átomo, polímeros verdes y otros ámbitos (Anastas and Warner 1998; Philp, Ritchie and Allan 2013). Unos 25 años después de la publicación de los 12 Principios de la Química Verde, numerosos artículos científicos y revisiones documentan cómo la química verde mejora la salud y la seguridad ambiental, y aporta ventajas económicas y competitivas. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, el número especial de la revista de la ACS bajo el título “Building on 25 Years of Green Chemistry and Engineering for a Sustainable Future” (Anastas and Allen 2016), la publicación de la ACS titulada “How Industrial Applications in Green Chemistry Are Changing Our World” (ACS 2015a), o diversas publicaciones del Green Chemistry & Commerce Council (n.d.).

Si bien los 12 Principios de la Química Verde son informativos y precisos, no pretenden ser prescriptivos, ni tienen un orden o peso estricto en lo que a su cumplimiento se refiere. En consecuencia, no existe un acuerdo sobre cuántos de estos principios deberían cumplirse para que una molécula o proceso sea calificado como “verde” (Zuin 2016). La intención es ser cada vez más verde, y los principios han de utilizarse como medio para alcanzar ese fin. En esencia, la narrativa de la química verde alienta la mejora continua del rendimiento en la innovación para proteger la salud humana y el medio ambiente, y los 12 principios sirven de referencia práctica. Ha creado un marco flexible respecto del compromiso con las acciones, y un proceso de aprendizaje en torno a esos compromisos. La implementación y el cumplimiento de los 12 principios constituyen un potente factor de motivación tanto para los investigadores como para las empresas químicas,

ya que crean oportunidades de recompensa. Este enfoque de motivación y flexibilidad es uno de los factores clave del éxito mundial del concepto de química verde.

### Una perspectiva más amplia y holística: la química sostenible

La noción de química sostenible fue promovida por la OCDE a finales de los años 90 (OECD 2012) y en los primeros años del decenio de 2000 (German Environment Agency 2009). La OCDE definió la química sostenible como un concepto científico que busca mejorar la eficiencia con la que se utilizan los recursos naturales para satisfacer las necesidades humanas de productos y servicios químicos (OECD 2018). Según esta perspectiva, la química sostenible abarca el diseño, la fabricación y el uso de productos y procesos químicos eficientes, eficaces, seguros y más respetuosos con el medio ambiente (cita traducida). Estimula la innovación en todos los sectores con el fin de diseñar y descubrir nuevos productos químicos, procesos de producción y prácticas de gestión de productos que proporcionen un mayor rendimiento y un mayor valor, cumpliendo al mismo tiempo los objetivos de proteger y mejorar la salud humana y el medio ambiente (cita traducida). Este ámbito se ha ampliado con el tiempo con aspectos adicionales de la sostenibilidad, por ejemplo, la evaluación del ciclo de vida completo, la conservación de los recursos, la promoción de la reutilización y el reciclaje, la aplicación de la responsabilidad social de las empresas, [y] la inclusión de los usuarios posteriores, como los consumidores (Bazzanella, Friege and Zeschmar Lahl 2017) (cita traducida).

Mientras que la química verde se caracteriza y se guía por principios científicos centrados en la innovación química, los recientes debates sobre la química sostenible sugieren un concepto más amplio y una interpretación más holística que tiene en cuenta las dimensiones económica, medioambiental y social. Al reconocer la interdependencia de los sistemas anidados (es decir, la economía dentro de la sociedad dentro de la biosfera) la química sostenible abarca un conjunto más amplio de temas. Entre ellos se encuentran, por ejemplo: la fabricación avanzada, las condiciones de trabajo seguras, las comunidades locales y los derechos humanos, las modalidades de

consumo y eliminación, los ciudadanos y la ética, y los nuevos modelos empresariales y de servicios (Blum *et al.* 2017; Kümmeler 2017). Garantizar que los productos químicos se gestionen de manera adecuada es una condición fundamental para la química sostenible.

Como se destaca en el segundo informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial, un reciente estudio de la Oficina de Rendición de Cuentas del Gobierno de los Estados Unidos (GAO) sobre la innovación en el ámbito de la química identificó temas comunes en relación a los objetivos que se plantea la química sostenible, entre ellos:

- ▶ Mejorar la eficiencia con la que se utilizan los recursos naturales [...] para satisfacer las necesidades humanas de productos químicos, evitando al mismo tiempo el daño medioambiental;
- ▶ Reducir o eliminar el uso o la generación de sustancias peligrosas [...];
- ▶ Proteger y beneficiar la economía, las personas y el medio ambiente mediante transformaciones químicas innovadoras;
- ▶ Tomar en consideración todas las etapas del ciclo de vida, por ejemplo, la fabricación, el

Figura 2.9: La tabla periódica de los elementos de la química verde y sostenible (Anastas and Zimmermann 2019, p. 6546)

Aspectos humanitarios		Química e ingeniería verdes							
1 <b>A</b> Tecnologías apropiadas para el mundo en desarrollo	Evitar la generación de desechos								
3 <b>Cw</b> Química para el bienestar	4 <b>Dd</b> Diseñar para evitar la dependencia								
11 <b>Sw</b> Acceso a agua segura y fiable	12 <b>Fg</b> Garantizar el acceso a los recursos materiales para las generaciones futuras	Economía del átomo	Síntesis menos peligrosa	Diseño molecular		Disolventes y productos químicos auxiliares	Energía	Sustancias intermediarias renovables	
19 <b>Bf</b> Química para la producción de alimentos benignos y la nutrición	20 <b>Tc</b> Transparencia para la comunicación química	21 <b>Wu</b> Utilización y valorización de los desechos	22 <b>Sa</b> Automontaje molecular	23 <b>Ru</b> Reducir el uso de materiales peligrosos	24 <b>Dg</b> Directrices de diseño	25 <b>Aq</b> Disolventes acuosos y de base biológica	26 <b>Ee</b> Síntesis y procesamiento eficientes de energía y materiales	27 <b>Ib</b> Biorrefinería integrada	
37 <b>J</b> Garantizar la justicia ambiental, la seguridad y la igualdad de oportunidades	38 <b>Cs</b> Química para la construcción y los edificios sostenibles	39 <b>Op</b> Síntesis en un solo reactor	40 <b>Ip</b> Procesos integrados	41 <b>Gc</b> Generación y consumo <i>in situ</i> de materiales peligrosos	42 <b>Cm</b> Modelos computacionales	43 <b>Il</b> Líquidos iónicos/solventes no volátiles	44 <b>R</b> Insumos energéticos renovables/libres de carbono	45 <b>C</b> Dióxido de carbono y otras sustancias intermediarias C1	
55 <b>Pc</b> Química para preservar el carbono natural y otros ciclos biogeoquímicos	56 <b>Ic</b> El código molecular de un individuo pertenece a ese individuo	57 <b>Pi</b> Intensificación del proceso	58 <b>As</b> Síntesis aditiva	59 <b>Ch</b> Funcionalización del enlace C-H	60 <b>Ba</b> Biodisponibilidad/ADME	61 <b>Sc</b> Fluidos subcríticos y supercríticos	62 <b>Es</b> Materiales de almacenamiento y transmisión de energía	63 <b>Sb</b> Biología sintética	
73 <b>Wo</b> No hay productos químicos de guerra ni de opresión	74 <b>Nc</b> Los códigos moleculares de la naturaleza pertenecen al mundo	75 <b>Ss</b> Autoseparación	76 <b>W</b> Derivados no covalentes/Transformación de fuerza débil	77 <b>Is</b> Seguridad inherente	78 <b>Ts</b> Cribado de alto rendimiento (Empírico/ <i>In Vivo</i> / <i>In Vitro</i> )	79 <b>S</b> Disolventes "inteligentes" (manejables, modificables)	80 <b>V</b> Utilización y valorización de la energía de los desechos	81 <b>Bt</b> Transformación biológicamente inducida	

uso y la eliminación [...] al evaluar el impacto medioambiental de un producto; y

- Minimizar el uso de recursos no renovables (US GAO 2018) (cita traducida).

La recientemente elaborada tabla periódica de los elementos de la química verde y sostenible (Anastas and Zimmerman 2019) está basada en los avances logrados hasta el momento en el ámbito de la química verde y la sitúa en un contexto más amplio de química sostenible y sostenibilidad. En el documento, la química verde y la ingeniería verde proporcionan los fundamentos científicos y tecnológicos de los elementos de química verde

y sostenible que en él se recogen, los cuales se complementan con otros elementos, como los objetivos humanitarios, las condiciones del sistema o los objetivos nobles. El enfoque adoptado en el documento defiende la noción de que para lograr un futuro sostenible es necesario trabajar en la intersección de la ciencia y la tecnología con los ecosistemas humano, social, cultural, económico, político, moral y ético (Anastas and Zimmerman 2019).

Otra iniciativa reciente que pretende facilitar la comprensión de la química sostenible es el proceso de diálogo entre los interesados del International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (ISC3).

			Condiciones de facilitación de los sistemas					Objetivos nobles
			Marcos conceptuales	Economic and market forces	Parámetros de medición	Políticas y reglamentos	Instrumentos	<sup>3</sup> Ho
			5 <b>B</b> Biomimesis	6 <b>Cb</b> Análisis coste-beneficio del ciclo de vida	7 <b>Ae</b> Economía del átomo	8 <b>Pr</b> Responsabilidad ampliada del productor	9 <b>Ea</b> Análisis epidemiológico y salud de los ecosistemas	10 <b>P</b> Diseño para la posteridad
			13 <b>Ce</b> Economía circular	14 <b>Fc</b> Contabilidad de costes totales	15 <b>Ef</b> Factor E	16 <b>Pb</b> Regulación basada en la propiedad	17 <b>Aa</b> Evaluación de alternativas	18 <b>Lp</b> Productos y procesos compatibles con la vida
Catálisis	Degradación	Medición y concienciación						
28 <b>E</b> Enzimas	29 <b>Bm</b> Metabolitos benignos	30 <b>Sn</b> Sensores	31 <b>Bd</b> Diseño intencionadamente benigno	32 <b>Hc</b> Gravamen por perjuicios/ impuesto sobre el carbono	33 <b>Ff</b> Factor F	34 <b>Ct</b> Transparencia química	35 <b>Lc</b> Evaluación del ciclo de vida	36 <b>Z</b> Cero desechos
46 <b>Ac</b> Catálisis de metales terrestres abundantes	47 <b>Md</b> Activadores de la degradación molecular	48 <b>Co</b> Control y optimización en proceso	49 <b>le</b> Ecología industrial	50 <b>Dc</b> Gravamen por agotamiento	51 <b>Ql</b> Métrica cualitativa	52 <b>Cl</b> Alquiler de productos químicos	53 <b>So</b> Pantallas de selección de disolventes	54 <b>Fi</b> La química es equitativa y plenamente integradora
64 <b>Ht</b> Catálisis heterogénea	65 <b>Dp</b> Polímeros degradables y otros materiales	66 <b>Ex</b> Exposoma	67 <b>Tg</b> Diseño transgeneracional	68 <b>Rf</b> Financiación sostenida de la investigación	69 <b>Qn</b> Métrica cuantitativa	70 <b>Se</b> Reglamentos de aplicación automática	71 <b>Cf</b> Pantallas de selección de disolventes	72 <b>De</b> Beneficios distribuidos equitativamente
82 <b>Hm</b> Catálisis homogénea	83 <b>Pd</b> Herramientas de predicción y diseño	84 <b>Ga</b> Química Analítica Verde	85 <b>Be</b> Economía de base biológica	86 <b>Ci</b> Inversión de capital	87 <b>Bb</b> Carga química corporal	88 <b>I</b> Ecosistema de innovación - Traducción del laboratorio al comercio	89 <b>Et</b> Educación en toxicología y pensamiento sistémico	90 <b>K</b> Un conocimiento químico extraordinario conlleva una responsabilidad extraordinaria



Ha reunido diferentes perspectivas, expectativas y criterios debatidos en el contexto de la química sostenible y es compatible con una interpretación holística del concepto de sostenibilidad (ISC3 2020a).

### Oportunidades de la química verde y sostenible para promover la circularidad

Se calcula que en 2020 el peso de los materiales fabricados por el hombre en la Tierra superará por primera vez la totalidad de la biomasa terrestre (Elhacham *et al.* 2020). Junto con la creciente escasez de recursos naturales (por ejemplo, metales), cada vez se despliegan más esfuerzos por promover la circularidad.

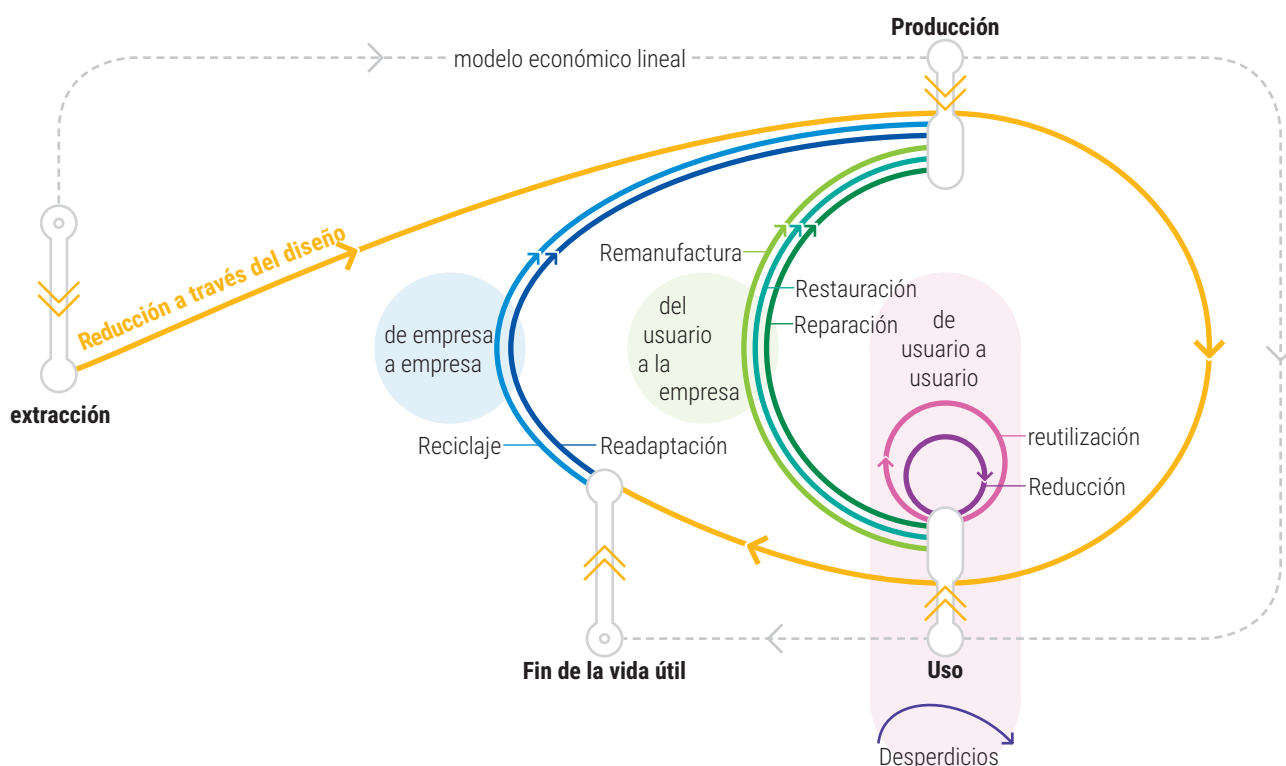
La circularidad es representada por el PNUMA, en su plataforma de circularidad, como algo que incluye los procesos descritos en la figura 2.10.

Sin embargo, muchos materiales son complejos y difíciles de recuperar y reciclar. Los plásticos, por ejemplo, suelen contener aditivos (por

ejemplo, plastificantes), piroretardantes, agentes colorantes o estabilizadores de luz ultravioleta que pueden ser peligrosos y difíciles de separar (Kümmerer, Clark and Zuin 2020).

La innovación en materia de química verde y sostenible puede desempeñar un papel importante en la promoción de la economía circular. Estimula el diseño de moléculas, materiales y productos que pueden reciclarse y reutilizarse más fácilmente que los que existen actualmente en el mercado. Ello puede lograrse, por ejemplo, eliminando las sustancias químicas que suscitan preocupación en los productos que actualmente impiden la recuperación y el reciclaje de manera racional (UNEP 2019b). En el caso de los productos que se liberan intencionalmente en el medio ambiente y que tienen aplicaciones abiertas al medio ambiente (por ejemplo, plaguicidas, cosméticos, biocidas o productos farmacéuticos), la innovación en materia de química verde y sostenible podría ayudar a diseñar moléculas y materiales que se mineralicen rápidamente en el medio ambiente, conservando las funciones deseadas (Kümmerer, Clark and Zuin 2020).

Figura 2.10: **Comprendiendo y visualizando la circularidad** (UNEP 2019c)



Para fomentar la integración de la química en una economía circular, Kümmerer, Clark y Zuin (2020) formulan 15 propuestas específicas, entre las que se incluyen: mantener la complejidad molecular y del producto al mínimo necesario para el rendimiento deseado; diseñar productos reciclables, incluidos todos los aditivos y otros componentes del producto; evitar que las materias primas se conviertan en un elemento esencial mediante la reducción de su uso y la recuperación y el reciclaje eficaces (por ejemplo, muchos metales); garantizar la trazabilidad y considerar el uso de pasaportes digitales de los productos (por ejemplo, su composición, componentes y procesos); y mantener los procesos lo más sencillos posible con

un número mínimo de pasos, sustancias auxiliares, energía y operaciones unitarias. Estas propuestas son plenamente compatibles con los diez objetivos de la química verde y sostenible presentados en el capítulo 3 y los complementan.

### Hacia una definición ampliada del rendimiento en la industria química

El impulso por estimular una transformación en la industria química que adopte plenamente lo que Zimmerman *et al.* (2020) denominan una “definición ampliada de rendimiento que incluye consideraciones de sostenibilidad” cobra cada vez

Figura 2.11: Características del sector químico presente y futuro (Zimmerman *et al.* 2020)

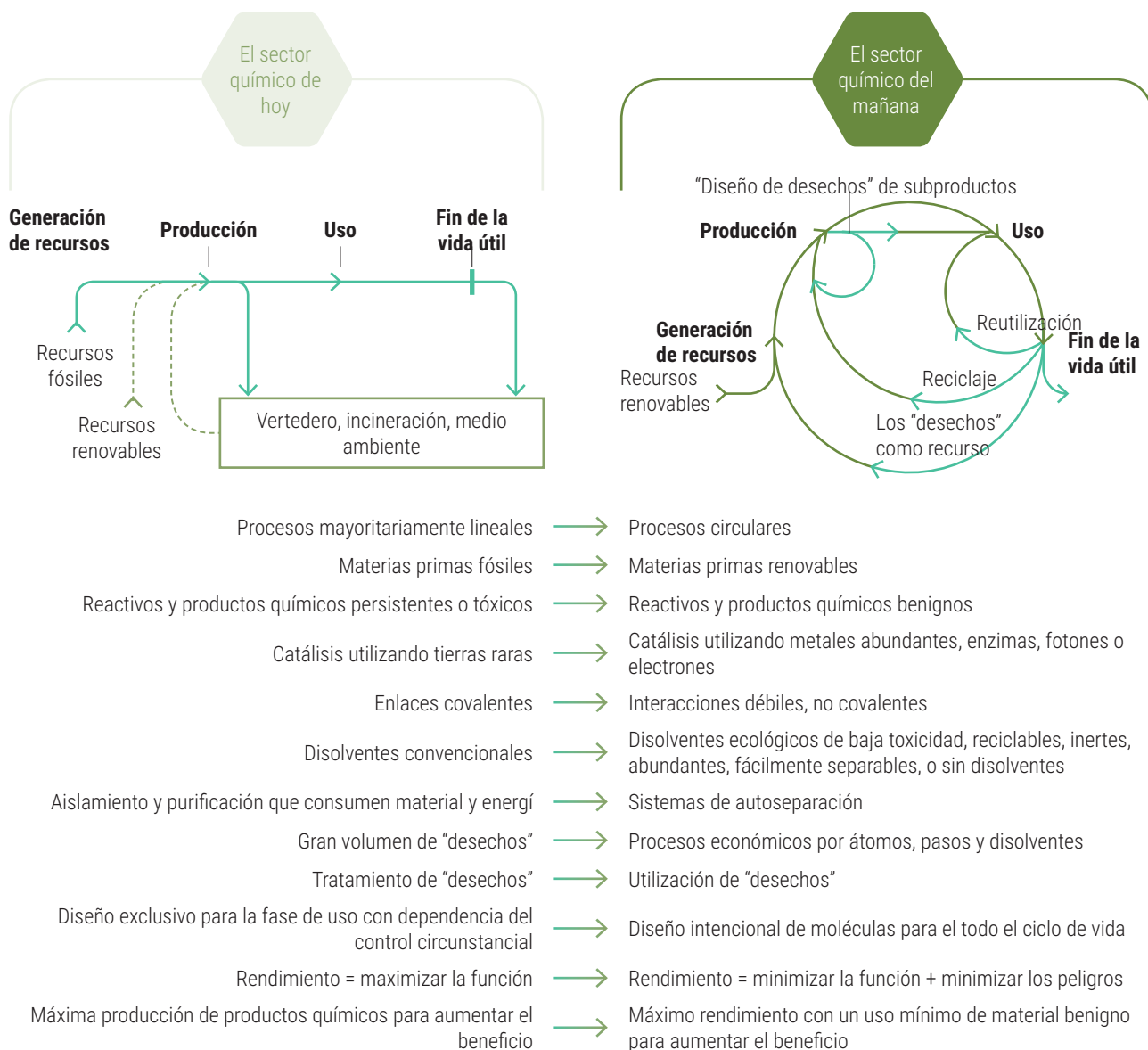
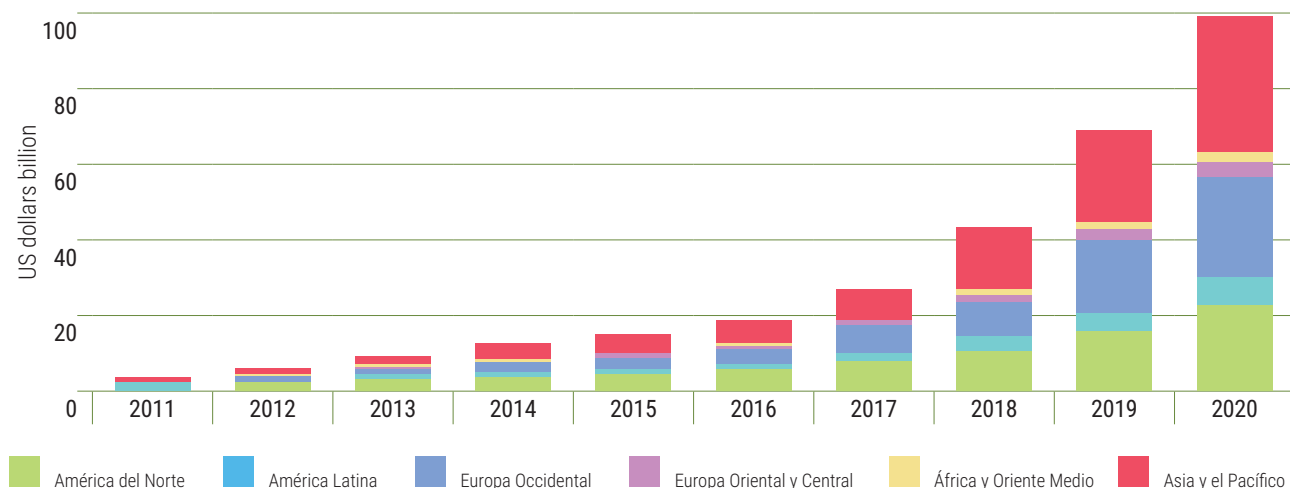


Figura 2.12: Ejemplos de cómo la química contribuye a las industrias que se prevé desempeñarán funciones importantes en el futuro (adaptado de World Economic Forum [WEF] 2017, p. 7)

		Las tasas de crecimiento proyectadas para las innovaciones claves	Ejemplos de los productos de interés de química y materiales avanzados
<b>Movilidad</b>	 Vehículos eléctricos	Ventas anuales de vehículos eléctricos <b>2020: 4,9 millones de dólares de los EE. UU.</b>	Plásticos, resinas compuestas y tecnologías de baterías
	 Drones	Dimensión del mercado de drones* <b>2015: 10.100 millones de dólares de los EE. UU</b> <b>2020: 14.900 millones de dólares de los EE. UU.</b>	Plásticos, resinas compuestas y tecnologías de baterías
<b>Teléfonos móviles y dispositivos inteligentes</b>	 Teléfonos inteligentes y tabletas	Dispositivos móviles en uso <b>2015: 8.600 millones de dólares EE. UU.</b> <b>2020: 12.100 millones de dólares de los EE. UU.</b>	Sustrato, placa base, conductor transparente, películas protectoras y resinas fotosensibles
	 Pantallas flexibles (por ejemplo, dispositivos portátiles, y de realidad virtual, televisores)	Mercado de pantallas AMOLED** <b>2016: 2.000 millones de dólares de los EE. UU.</b> <b>2020: 18.000 millones de dólares de los EE. UU.</b>	Sustrato, placa base, conductor transparente, películas protectoras y fotoresinas
<b>Conectividad e informática</b>	 Internet de alta velocidad	Velocidad de la banda ancha fija <b>2015: 24,7 Mbps</b> <b>2020: 47,7 Mbps</b>	Clorosilano para vidrio ultra puro
	 Circuitos integrados más eficientes y pequeños	Longitud de las puertas lógicas del procesador <b>2015: 14 mm</b> <b>2020: 7 mm</b>	Dieléctricos, sílice coloidal, resinas fotosensibles, potenciadores del rendimiento y eliminadores de bordes

\* Sectores de la defensa, la seguridad nacional y el comercio\*\* OLED de matriz activa

Figura 2.13: Mercado mundial de productos químicos ecológicos por regiones (en miles de millones de dólares EE. UU.), 2011-2020 (Pike Research 2011)



El presente material protegido por derechos de autor es propiedad de Mary Ann Liebert, Inc.

mayor fuerza. Este concepto ampliado tiene como punto de partida el examen de las propiedades inherentes de las moléculas, para garantizar que los compuestos, procesos y productos cumplan con altos estándares de sostenibilidad. Esta transformación requerirá una innovación que vaya más allá de los enfoques tradicionales de la innovación química y que aporte un pensamiento sistémico y un diseño de sistemas que tenga su punto de partida en el nivel molecular y un impacto positivo a escala mundial (Zimmerman *et al.* 2020) (cita traducida).

### El potencial de la química verde y sostenible para los sectores industriales del futuro

La contribución de la química a muchos mercados finales de interés para la configuración del futuro de un desarrollo que sea sostenible es significativa. Cabe citar como ejemplos la industria del transporte, la construcción, la alimentación y el envasado, así como la gestión de desechos. La figura 2.12 ofrece algunos ejemplos de cómo la química contribuye a las industrias que desempeñan un papel en el desarrollo sostenible de cara al futuro. Es esencial aplicar consideraciones de química verde y sostenible en las innovaciones pertinentes.

### Posibilidades de mercado de la química verde y sostenible

Si bien es cierto que existen diferencias en la caracterización de la química verde y sostenible, los datos de que se dispone -aunque limitados- indican que la oferta y la demanda de productos químicos más ecológicos y sostenibles está creciendo considerablemente. Según informes, el valor de mercado de la industria mundial de la química verde ascendía en 2015 a más de 50.000 millones de dólares de los Estados Unidos (BCC Research 2016) y se preveía que crecería hasta llegar a los 100.000 millones de dólares de los Estados Unidos antes de 2020 (Bernick 2016). Asia y el Pacífico, Europa Occidental y América del Norte son las principales regiones donde se ha producido un crecimiento del mercado, figura 2.13 (Pike Research 2011). Una investigación más reciente indica que la dimensión del mercado mundial de productos químicos ecológicos crecerá en casi 50.000 millones de dólares de los Estados Unidos durante el período 2019-2023 a una tasa compuesta de crecimiento anual (TCCA) cercana al 10 % (Business Wire 2019).







¿QUÉ SE PUEDE CONSEGUIR  
CON LA ADOPCIÓN DE  
MEDIDAS EN EL ÁMBITO  
DE LA QUÍMICA VERDE Y  
SOSTENIBLE? **OBJETIVOS  
Y CONSIDERACIONES  
ORIENTATIVAS** >

Visión de la química verde y sostenible 30

Objetivos y consideraciones orientativas 30

Examen amplio de los diez objetivos  
de la química verde y sostenible 33

# Visión de la química verde y sostenible

---

La visión de la química verde y sostenible hace hincapié en el potencial que tiene la química de ser plenamente compatible con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Dicho en otras palabras, la química y la industria química mundial deben, a la larga, estar en plena consonancia con las dimensiones ambientales, sociales y económicas del desarrollo sostenible. La visión incluye tanto innovaciones para ecologizar y hacer más sostenible la química como la herencia tóxica y persistente vinculada a los productos químicos del pasado, con vistas a minimizar los efectos adversos en todo el ciclo de vida de los productos químicos y los productos en general.

Un gran número de Objetivos de Desarrollo Sostenible puede beneficiarse de las contribuciones directas de la química verde y sostenible, por ejemplo: hambre cero (ODS 2), salud y bienestar (ODS 3), agua limpia y saneamiento (ODS 6), energía asequible y no contaminante (ODS 7), producción y consumo responsables (ODS 12) y acción climática (ODS 13). Al reducir o eliminar los peligros químicos y sus efectos conexos en la salud, el medio ambiente y la contaminación, la química verde y sostenible también contribuye a otros ODS, por ejemplo, condiciones de trabajo decentes y crecimiento económico (ODS 8), innovación e infraestructura (ODS 9), vida submarina (ODS 14) o vida de ecosistemas terrestres (ODS 15).

## Objetivos y consideraciones orientativas

---

La visión de una química verde y sostenible puede alcanzarse a través de nuevos diseños e innovaciones en el ámbito de la química que provean funciones y servicios convenientes en relación con productos químicos, materiales, productos y procesos de producción, sin causar daños a la salud humana y al medio ambiente, y que, al mismo tiempo, cumplan objetivos de desarrollo más amplios. La “innovación química”, en este contexto, incluye la innovación en el ámbito de la química (es decir, nuevas moléculas/compuestos químicos), las innovaciones en el ámbito de las ciencias de la ingeniería química (es decir, procesos químicos y producción sostenible), así como en esferas conexas (por ejemplo, desarrollo de productos).

Aparte de los 12 Principios de la Química Verde y los 12 Principios de Ingeniería Verde, no existe un manual de referencia que ayude a comprender mejor qué abarca la “química verde y sostenible”. Tampoco existe un conjunto de criterios convenidos que puedan aplicarse para determinar cuán “ecológico” o “sostenible” es un producto químico o un proceso industrial (UNEP 2019b).

El presente Manual de Referencias tiene el objetivo de fomentar una mayor comprensión, presentando diez objetivos y consideraciones orientativas sobre los fines que persigue la química verde y sostenible. Esos objetivos alientan a los agentes a que orienten sus actividades en el ámbito de las innovaciones químicas hacia la innovación ecológica sostenible

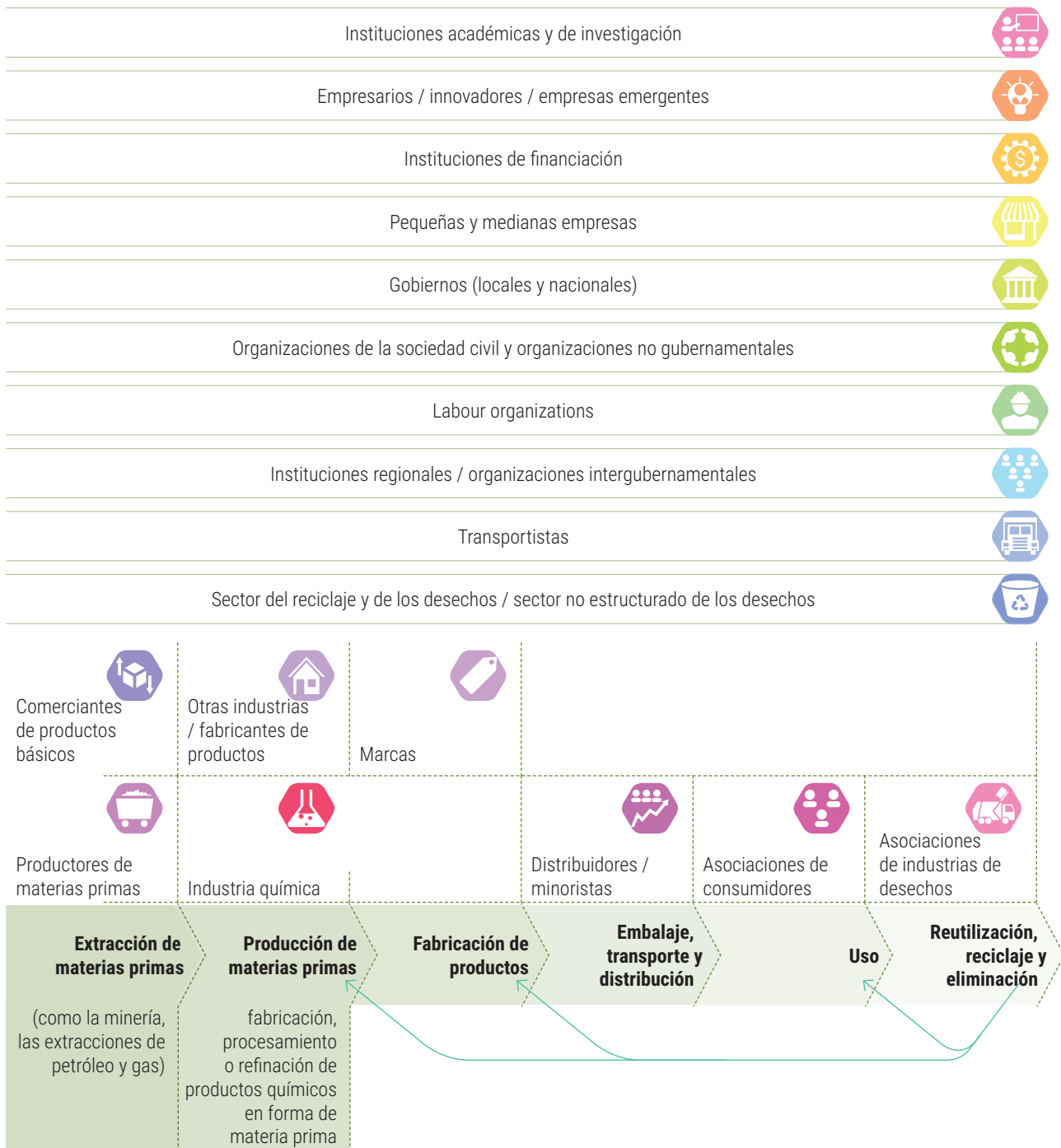
y se proponen servir de inspiración para ello. Están dirigidos a interesados en la innovación, gestión y formulación de políticas en el ámbito de la química. Entre los interesados figuran, si bien no exclusivamente, químicos, ingenieros químicos, diseñadores de productos, responsables de la adopción de decisiones en el sector privado,

Gobiernos y otros grupos de interesados, así como usuarios y consumidores. En la figura 3.2 se recogen grupos de interesados y públicos destinatarios de la química verde y sostenible en la cadena de valor, utilizando como base una categorización similar de la cadena de valor de los plásticos que figura en Ryberg, Laurent and Hauschild (2018).

Figura 3.1: Los diez objetivos de la química verde y sostenible

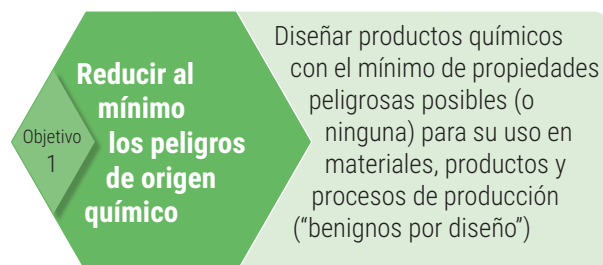


Figura 3.2: Grupos de interesados y públicos destinatario de la química verde y sostenible en la cadena de valor (adaptado de Ryberg, Laurent and Hauschild 2018, p.10)



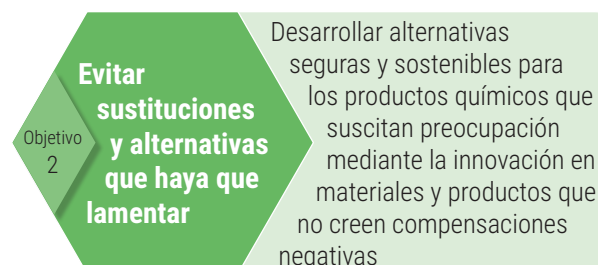
# Examen amplio de los diez objetivos de la química verde y sostenible

En las siguientes secciones se presentan los diez objetivos y algunas consideraciones orientativas, que comprenden desde el diseño molecular basado en los principios de la química verde hasta la garantía de que las innovaciones químicas tengan en cuenta las necesidades de la sociedad. A cada objetivo le corresponde una nota explicativa, se mencionan los grupos destinatarios pertinentes para el objetivo, y se ofrece una breve descripción de lo que se procura lograr. Aunque los objetivos son distintos, en algunos casos puede producirse una superposición, debido a la complejidad y la amplitud del tema. En vista de la función intersectorial de los responsables gubernamentales de la adopción de decisiones sobre la formulación de políticas y la creación de un entorno propicio, los diez objetivos y las consideraciones orientativas son importantes para este grupo.



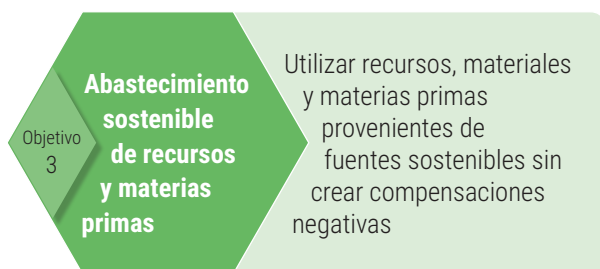
El primer objetivo está directamente relacionado con los químicos, los ingenieros químicos y los diseñadores de materiales y productos que se ocupan de la innovación en el ámbito de la química y la ingeniería química. Promueve el diseño y uso de moléculas químicas (o grupos de moléculas) con propiedades peligrosas para los seres humanos y el medio ambiente reducidas al mínimo (o con ninguna), como, por ejemplo, la toxicidad, la persistencia, la movilidad y otras. Diseñar productos libres de riesgos ayuda a crear materiales, productos y procesos de producción más seguros y sostenibles y facilita la reutilización y el reciclaje, y, desde el inicio, tiene en cuenta los problemas de las fases posteriores. Así, se satisface la creciente

demanda de los consumidores, se refuerza la competitividad y se ayuda a que se cumpla con lo dispuesto en los marcos regulatorios, con la reutilización, el reciclaje y la eliminación segura, entre otros aspectos. A la hora de determinar los peligros químicos, siempre que sea posible, se deberían utilizar métodos de prueba sin animales.

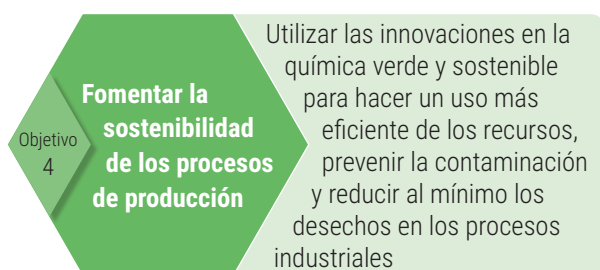


El segundo objetivo está dirigido a los diseñadores de materiales y productos, así como a los químicos. Promueve la introducción de innovaciones en la química, los materiales o los productos para desarrollar y aplicar alternativas a los productos químicos (o grupos de productos químicos) que actualmente suscitan preocupación en relación con la salud humana y el medio ambiente. El criterio de referencia es diseñar e introducir alternativas que no causen efectos negativos ni comprometan otros objetivos de desarrollo (por ejemplo, la mitigación del cambio climático). De no ser así, podría tratarse de sustituciones que habría que lamentar a la larga. Las alternativas pueden realizar las funciones deseadas mediante enfoques sin productos químicos. La consecución de este objetivo se facilita utilizando equipos multidisciplinares, a saber, fabricantes, autoridades reguladoras, expertos en salud y seguridad y evaluaciones de alternativas para determinar las posibles compensaciones.



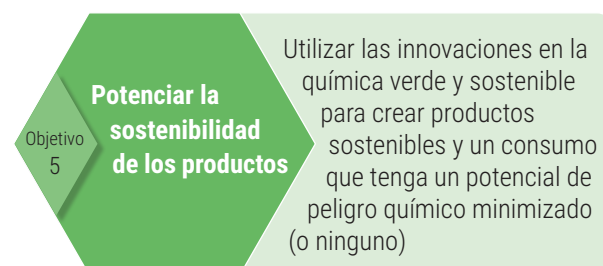


El tercer objetivo es importante para los interesados de los sectores de la minería, el procesamiento, la agricultura, así como los químicos, los ingenieros, los directores en la cadena de suministro y los ingenieros de la industria química. Alienta el uso de recursos, materiales y materias primas sostenibles y renovables en el ámbito de la química, entre los que cabe citar, las materias primas de los productos químicos reciclados, así como las materias primas de base biológica, si se pueden satisfacer criterios de sostenibilidad más amplios. También procura fomentar el uso sostenible de recursos escasos, como, por ejemplo, determinados metales. En el caso de las materias primas de base biológica, el reconocimiento de la necesidad de contar con tierras agrícolas para producir alimentos y de limitar los efectos destructivos de las materias primas en los bosques y los ecosistemas está entre los criterios de sostenibilidad que se han de tener en cuenta.



El cuarto objetivo es importante para los químicos, ingenieros químicos e ingenieros industriales, así como para los expertos en materia de gestión de desechos involucrados en la búsqueda de soluciones en el ámbito de la química y la ingeniería química que puedan mejorar los procesos de producción industrial y estimular la prevención de la contaminación, así como la reutilización y el reciclaje de materiales. Promueve la innovación química a fin de aumentar la eficiencia en el uso de los recursos, reducir al mínimo los desechos industriales y alentar la reutilización y el reciclaje de productos químicos y materiales durante los

procesos de producción. Ello puede lograrse mediante una gestión sostenible de los recursos y una producción más limpia.

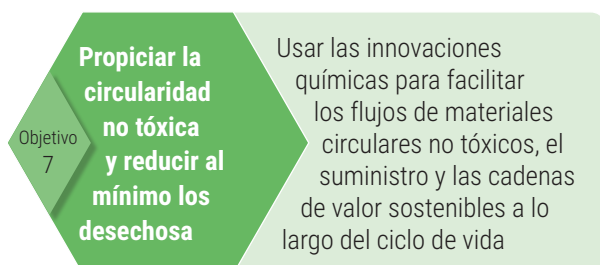


El quinto objetivo es importante para los gerentes de marcas, diseñadores de productos y materiales, químicos e ingenieros químicos involucrados en el diseño y la producción de productos. Alienta las innovaciones en química para diseñar y producir productos sostenibles que no sean tóxicos ni planteen peligros, que tengan una larga duración (es decir, duración de la vida útil y vida en servicio, posibilidad de reparación) y que puedan ser reutilizados o reciclados en el contexto de una economía circular. Se trata de una dimensión importante del fomento del consumo sostenible.

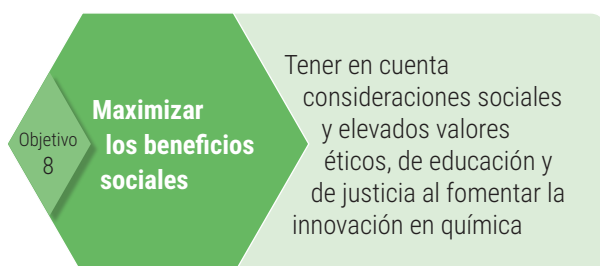


El sexto objetivo es importante para los encargados de la producción, los ingenieros químicos y los químicos involucrados en los procesos industriales y el desarrollo de productos, así como para otros interesados a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, por ejemplo el sector de los desechos. Alienta las innovaciones en el ámbito de la química con el objetivo de reducir al mínimo las liberaciones proyectadas y no proyectadas de productos químicos en espacios cerrados y en el exterior durante los procesos de fabricación, uso de los productos y su eliminación. Ello puede lograrse, por ejemplo, creando nuevos diseños que minimicen o eliminen los productos químicos peligrosos en los productos; maximizando el uso de sistemas cerrados de producción; garantizando

la reutilización y el reciclaje de los materiales; realizando evaluaciones del ciclo de vida y mediante la transparencia de la información. La comunicación entre los interesados a lo largo de toda la cadena de valor es fundamental para el logro de este objetivo.



El séptimo objetivo reviste importancia para todos los interesados, a saber, los ciudadanos, los consumidores, los responsables de la adopción de decisiones, los inversores, así como los científicos y los innovadores que se ocupan del desarrollo de productos y de los procesos industriales y se interesan en estos temas. Alienta la innovación en el ámbito de la química verde y sostenible para promover la gestión sostenible de materiales, que incluye el mantenimiento del valor de los materiales durante el ciclo de vida de un producto. Va más allá de la minimización de las emisiones al medio ambiente, ya que promueve la eliminación de los compuestos tóxicos en los productos para que se puedan reutilizar y reciclar, minimizando de ese modo la generación de desechos.

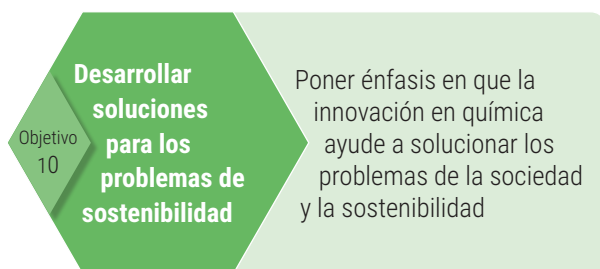


El octavo objetivo reviste importancia para todos los interesados, a saber, los ciudadanos, los consumidores, los encargados de formular políticas. El personal directivo y los científicos involucrados en la gestión racional de los productos químicos y los desechos. Reconoce los beneficios de los productos y procesos químicos, pero admite que dichos beneficios a menudo no se distribuyen de forma equitativa. Promueve la

idea de que la innovación en la química se haga de manera que sea plenamente compatible con objetivos de sostenibilidad social más amplios, que incluyen, entre otros, la ética, la educación y la justicia socioeconómica. Se deben tener en cuenta consideraciones específicas, entre otras: la protección de los trabajadores y de las comunidades desfavorecidas; la accesibilidad a todos de los productos de la química sostenible; la necesidad de apoyo financiero y técnico de forma que todos los países y empresarios puedan tener éxito; el fomento de una educación que tenga en cuenta los efectos desproporcionados y garantice que todos puedan disfrutar de los beneficios de la química sostenible.



El noveno objetivo reviste importancia para todos los interesados, a saber, los ciudadanos, los consumidores, los trabajadores, los encargados de formular políticas, el personal directivo y los científicos involucrados en la gestión racional de los productos químicos y los desechos. Destaca que la química verde y sostenible debe ir acompañada de medidas de gestión y protección más amplias para garantizar la gestión racional de los productos químicos y los desechos, como es el caso de la aplicación del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS). Reconoce que los trabajadores, las comunidades marginadas y los consumidores se encuentran entre los más afectados por la contaminación ambiental y deberían ser considerados explícitamente al proponer prioridades y soluciones en el marco de la química verde y sostenible (Alcántar *et al.* 2017). Promueve también el acceso al conocimiento, la educación y la participación (de los ciudadanos, los consumidores y los sectores público y privado) para proteger la salud humana y el medio ambiente contra los productos químicos peligrosos.



El décimo objetivo es importante para todo el personal directivo y científico involucrado en un diálogo social más amplio sobre la función de la industria química en la satisfacción de las necesidades de la sociedad, y, al mismo tiempo, en el fortalecimiento y fomento del desarrollo sostenible. Insta a participar, priorizar y crear certeza para centrar la innovación en química para el desarrollo de soluciones que aborden los problemas de la sostenibilidad, que incluyan, entre otros, la seguridad alimentaria, el bienestar humano, el cambio climático, la diversidad biológica, la contaminación y la resiliencia de la cadena de suministro (a nivel local y global). Asimismo, insta a que se consideren motivaciones más amplias, como, por ejemplo, el impacto del desarrollo de programas informáticos en relación con el aumento de los desechos eléctricos o

los efectos en la sostenibilidad de los ciclos de innovación cortos en la industria textil (moda rápida).

### Factores determinantes de una implementación eficaz

La implementación de los diez objetivos y las consideraciones orientativas para la química verde y sostenible exige cambios fundamentales en cuanto a la sensibilización y la creación de nuevos conocimientos y prácticas en el ámbito de la innovación. El siguiente capítulo 4 presenta ámbitos y temas relacionados con la tecnología y la innovación que se consideran especialmente importantes para la promoción de la química verde y sostenible. En los capítulos 5, 6 y 7 se presentan las herramientas, las medidas de facilitación y los criterios de medición pertinentes, y en el capítulo 8 se hace una exhortación a todos los interesados para que amplíen sus medidas. En un manual especializado que se publicará en 2021 se aborda el importante tema transversal de la educación y el aprendizaje para potenciar la química verde y sostenible.











# INNOVACIÓN QUÍMICA Y TECNOLÓGICA PARA PROMOVER LA QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBLE >

4.1	Elementos de un marco de investigación e innovación en relación con la química verde y sostenible	40
4.2	Materias primas químicas renovables y de base biológica	41
4.3	Oportunidades de innovación química	44
4.4	Oportunidades de innovación de procesos	51
4.5	Oportunidades de digitalización para fomentar la química verde y sostenible	54
4.6	Potencial de innovación en química verde y sostenible en un sector: el ejemplo de la energía	55

## 4.1 Elementos de un marco de investigación e innovación en relación con la química verde y sostenible

---

Cada vez es mayor el número de revistas científicas internacionales que publican artículos sobre investigaciones e iniciativas en materia de innovación bajo el tema de la química verde y sostenible, que se aborda también abordados en conferencias científicas internacionales. Si bien esas actividades aportan un rico conjunto de temas, a nivel mundial no existe un marco que estructure los temas relativos a la investigación y la innovación en el ámbito de la química verde y sostenible. El presente capítulo aspira a contribuir a este debate, presentando temas de química y tecnología que se consideran importantes para el avance de la innovación en el ámbito de la química verde y sostenible. De este modo procura comunicar información sobre el desarrollo de un programa de investigación internacional relativo a la química verde y sostenible.

Los temas que se abordan en este capítulo han sido seleccionados a partir de una revisión de las publicaciones sobre química verde y sostenible (por ejemplo, Bazzanella, Friege and Zeschmar-Lahl 2017; Zimmerman *et al.* 2020), así como de programas de conferencias que incluyen artículos académicos sobre la química verde y sostenible. Entre estas últimas se encuentran, por ejemplo, la serie de conferencias ACS Green Chemistry Engineering Conference (ACS 2020b) o la conferencia anual de Elsevier Green & Sustainable Chemistry (Elsevier 2020a). Los temas comprenden desde el desarrollo de moléculas más benignas para productos químicos seleccionados (o grupos de productos químicos que suscitan preocupación) hasta el uso de innovaciones de la química para aumentar la eficiencia en el uso de los recursos en los procesos de producción. Varios de esos temas y productos químicos de interés se abordan por medio de convenios mundiales, como es el caso de los Convenios de Basilea y Estocolmo. El capítulo también presenta al sector de la energía como uno (de los muchos posibles) ejemplos de cómo la innovación en la química ecológica y sostenible puede contribuir al desarrollo sostenible a nivel sectorial.

Los temas y ejemplos que se presentan no han sido evaluados desde la perspectiva de la sostenibilidad. Para determinar si son “más ecológicos” o “más sostenibles” que las prácticas actuales, es posible que se requiera hacer una evaluación del ciclo de vida y una evaluación social que permita definir los supuestos, las estimaciones de las emisiones y evaluar los impactos. Además, las evaluaciones cualitativas pueden ser útiles para detectar posibles compensaciones. Por ejemplo, un plástico biodegradable no necesariamente potencia la sostenibilidad, a menos que estén dadas las condiciones que aseguren que se degradará completamente (por ejemplo, en una planta de compostaje industrial). Lograr compensaciones o impactos cero es, en cualquier caso, un reto y poco probable. En el capítulo 5 y En el segundo informe Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial, se ofrecen más detalles de la evaluación del ciclo de vida.

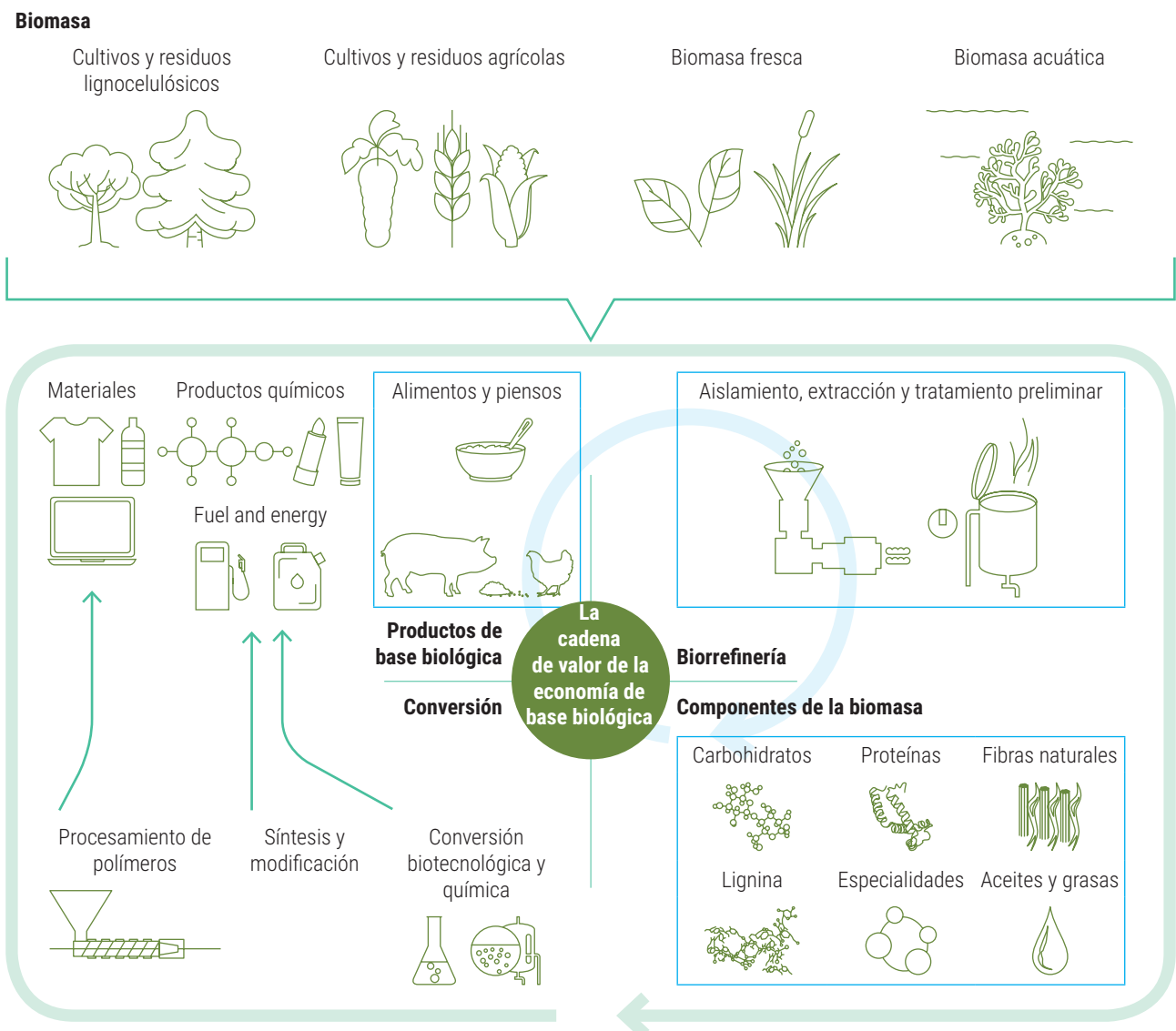
## 4.2 Materias primas químicas renovables y de base biológica

### Materias primas de base biológica

Durante más de un siglo, la industria química ha utilizado recursos fósiles (principalmente petróleo, carbón y gas) para producir productos químicos básicos como el amoníaco, el metanol, el etileno y el propileno. Estos productos químicos sirven de base a una amplia gama de otros productos químicos, materiales y productos en general de la cadena de

valor de la industria química. Dado el agotamiento (y finalmente la escasez) de los recursos fósiles, su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero y las incertidumbres en las cadenas mundiales de suministro, se están explorando las oportunidades de utilizar nuevas fuentes de base biológica para producir materias primas químicas, lo cual está en consonancia con el séptimo principio de la química verde, que postula que una materia

Figura 4.1: Cadena de valor de base biológica (Wageningen University & Research [WUR] n.d a)



#### Recuadro 4.2: **La biomasa y las materias primas de base biológica no siempre son las más sostenibles**

El uso de la biomasa y las materias primas renovables en la industria química es prometedor, pero, al mismo tiempo, suscita dudas y preocupaciones importantes en relación con la sostenibilidad.

Un aspecto importante que debe tenerse en cuenta es el abastecimiento de la biomasa. Por ejemplo, el uso de biomasa resultante del desmonte de bosques para la creación de plantaciones o de la ocupación de tierras puede conducir a la destrucción de hábitats, a la emisión de gases de efecto invernadero y a la erosión de tierras de cultivo con repercusiones negativas en las comunidades. Del mismo modo, el uso de plaguicidas y fertilizantes en la producción de biomasa a través de la agricultura industrial puede tener efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.

Por lo tanto, es esencial contar con un abastecimiento de biomasa y materias primas sostenible. La biomasa obtenida de las microalgas puede, por ejemplo, cultivarse en tierras no cultivables, lo que ayudaría a revertir la desertificación y convertir el CO<sub>2</sub> en materias primas mediante la fotosíntesis (Karan et al. 2019). El uso de desechos agrícolas en lugar de cultivos como biomasa puede, en determinadas condiciones, potenciar la eficiencia en el uso de los recursos y la circularidad.

Un segundo aspecto que debe tenerse en cuenta es la naturaleza de los productos químicos, los materiales y los productos en general producidos a partir de biomasa. Aunque las biorrefinerías reducen las necesidades energéticas, la necesidad de recursos fósiles y la emisión de determinados productos químicos peligrosos, los productos químicos que producen (por ejemplo, el amoníaco) pueden ser los mismos que se producen mediante los procesos petroquímicos. Estos productos químicos plantean entonces los mismos peligros potenciales y los productos que ellos ayudan a producir como productos intermedios no son más benignos.

En el caso de los bioplásticos, por ejemplo, en un estudio reciente se ha descubierto que la mayoría de los bioplásticos y los materiales de origen vegetal contienen productos químicos tóxicos, y que los materiales de base biológica/biodegradables y los plásticos convencionales son igualmente tóxicos (Zimmermann et al. 2020). Un ejemplo de ello es el desarrollo del policloruro de vinilo a partir de una materia prima de base biológica, que no plantea los posibles problemas de formación de dioxinas durante la eliminación inadecuada del policloruro de vinilo.

En resumen, la sustitución de las materias primas fósiles por materias primas procedentes de fuentes renovables no necesariamente promueve la sostenibilidad. Por lo tanto, es importante tener en cuenta las ventajas y desventajas de utilizar diversas fuentes de materias primas y procesos del sector de la química. Los enfoques del ciclo de vida pueden proporcionar una valiosa orientación para las evaluaciones de este tipo.

prima debería ser renovable y no agotarse siempre que sea técnica y económicamente viable (Anastas and Warner 1998) (cita traducida).

La biomasa se deriva de organismos vivos, normalmente plantas. Las tecnologías empleadas en las biorrefinerías hacen posible la producción de diversos productos químicos básicos que tradicionalmente han sido producidos utilizando tecnologías empleadas en las refinerías petroquímicas, de alto consumo energético y contaminantes (Kohli, Prajapati and Sharma 2019). Entre los ejemplos se pueden citar los biocombustibles, los elementos constitutivos de productos químicos, el bioetileno y el biopropileno (como sustitutos del etileno y el propileno derivados de los combustibles fósiles) o los polímeros biodegradables. Por lo tanto, la biomasa puede servir de base para muy diversos productos

y aplicaciones, entre otros, alimentos, energía, materiales y productos farmacéuticos.

#### **El dióxido de carbono como recurso y materia prima**

Existen varios métodos para usar el CO<sub>2</sub>, que es un potente gas de efecto invernadero, como recurso. Entre ellos se encuentran la conversión de CO<sub>2</sub> en combustibles, el uso de CO<sub>2</sub> como materia prima para la industria química y los usos de CO<sub>2</sub> no relacionados con la conversión (International Energy Agency [IEA] 2019). Estas tecnologías tienen potencial para absorber CO<sub>2</sub> de la atmósfera y, por tanto, pueden contribuir a mitigar el cambio climático. Sin embargo, dado que requieren importantes cantidades de energía, es esencial usar energía renovable para cumplir los criterios



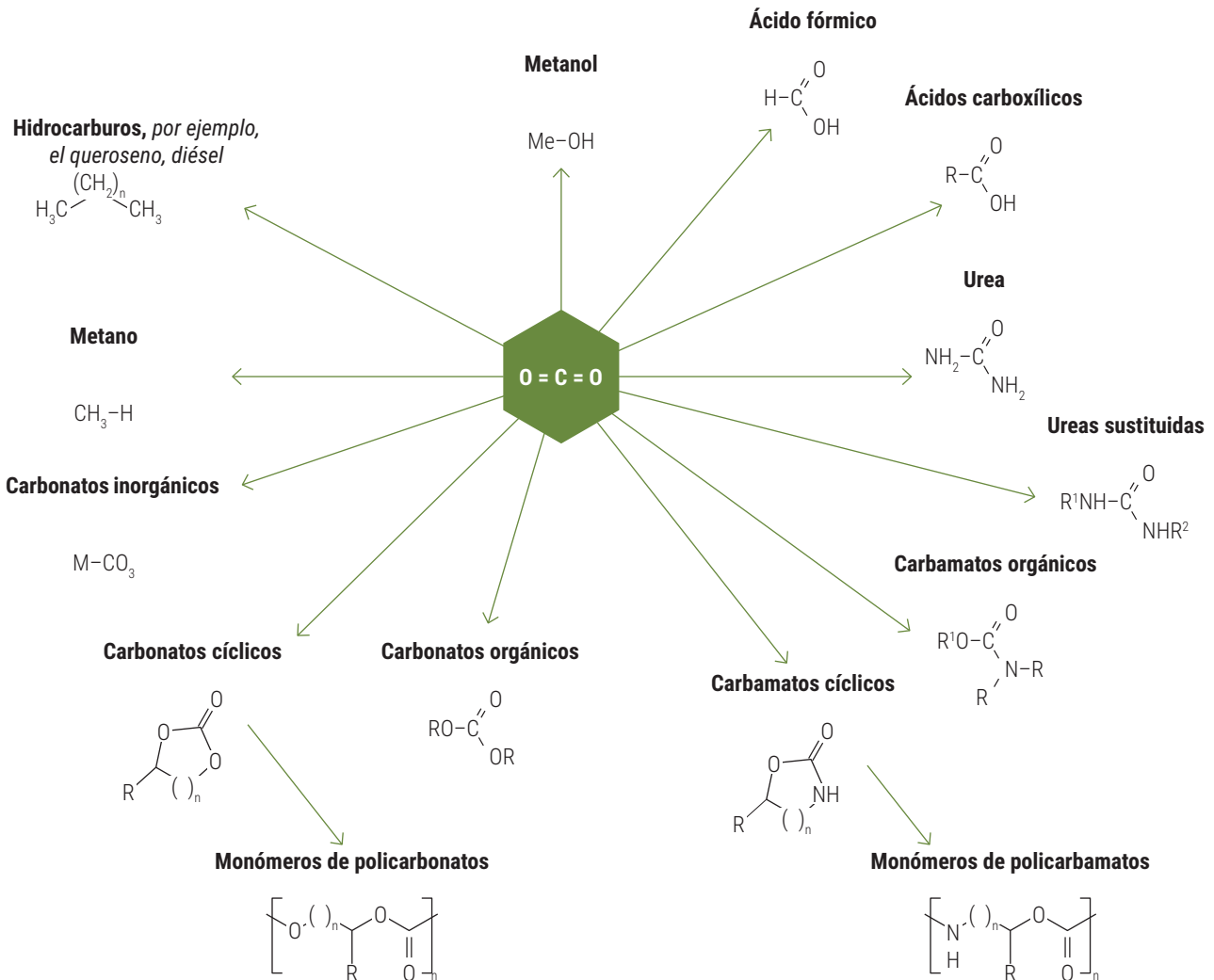
de sostenibilidad. La figura 4.2 ofrece un panorama general de las oportunidades de utilizar el dióxido de carbono como recurso y materia prima en la industria química. Si bien algunas tecnologías se encuentran en una etapa de investigación básica, otras ya han alcanzado su madurez, pero todavía no han logrado un avance decisivo en el sector comercial.

Como recurso para producir combustible, el CO<sub>2</sub> puede convertirse mediante procesos químicos y electroquímicos en otros productos químicos que almacenen energía. Esos gases incluyen el gas sintético, el ácido fórmico, el metano, el etileno, el metanol o el éter dimetílico (DME). Como para este tipo de conversión se requieren importantes cantidades de energía, es particularmente esencial usar energías renovables en estos procesos.

Como sustancia intermediaria, el CO<sub>2</sub> tiene potencial para sustituir diversas materias primas fósiles en la producción de productos químicos básicos que se utilizan para producir sustancias químicas comerciales. Otros usos del CO<sub>2</sub> como materia prima son la inserción del CO<sub>2</sub> en epóxidos para la fabricación de materiales poliméricos o la conversión del CO<sub>2</sub> en minerales inorgánicos para materiales de construcción. De esta manera se almacena CO<sub>2</sub> en el producto. En cuanto a la conversión del CO<sub>2</sub> en combustible, es importante utilizar fuentes de energía renovables.

El uso de CO<sub>2</sub> no relacionado con la conversión no entraña reacciones químicas para convertir CO<sub>2</sub> en otros productos químicos. Algunos ejemplos son la inyección de CO<sub>2</sub> supercrítico (fluido) en pozos de petróleo para mejorar la recuperación de petróleo

Figura 4.2: **Panorama general de los productos químicos derivados del dióxido de carbono** (Styring *et al.* 2012, p. 11)

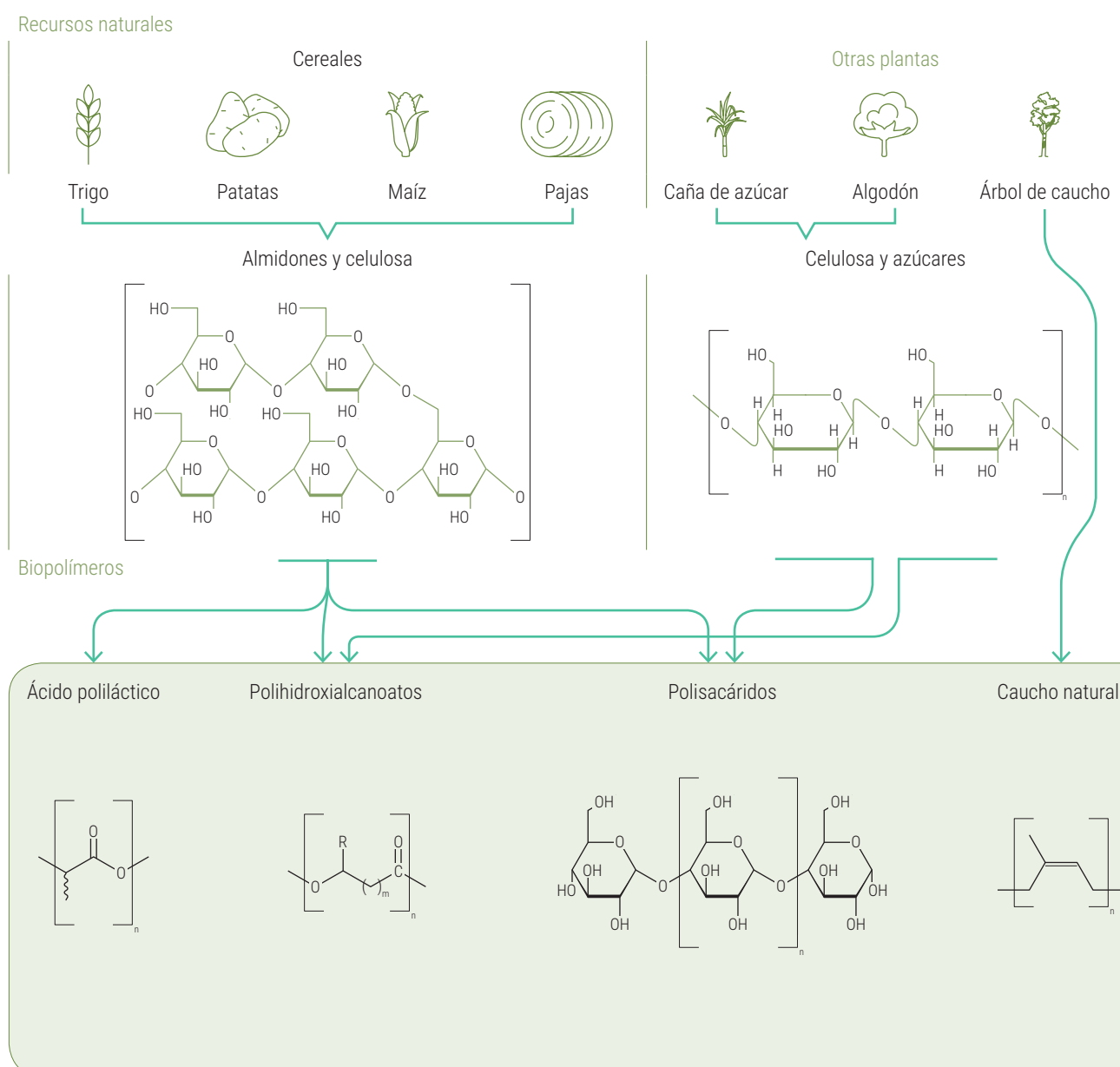


o la recuperación de metano de las vetas de carbón no explotadas. El CO<sub>2</sub> supercrítico también puede utilizarse como solvente en el procesamiento de productos químicos (por ejemplo, la extracción de aromas) y se está explorando como fluido térmico

para determinadas aplicaciones geotérmicas. En este caso también es importante reconocer las necesidades energéticas y las consecuencias vinculadas al CO<sub>2</sub> supercrítico (fluido).

## 4.3 Oportunidades de innovación química

Figura 4.3: Panorama general de los biopolímeros y su origen natural (Bocqué *et al.* 2015, p. 15)

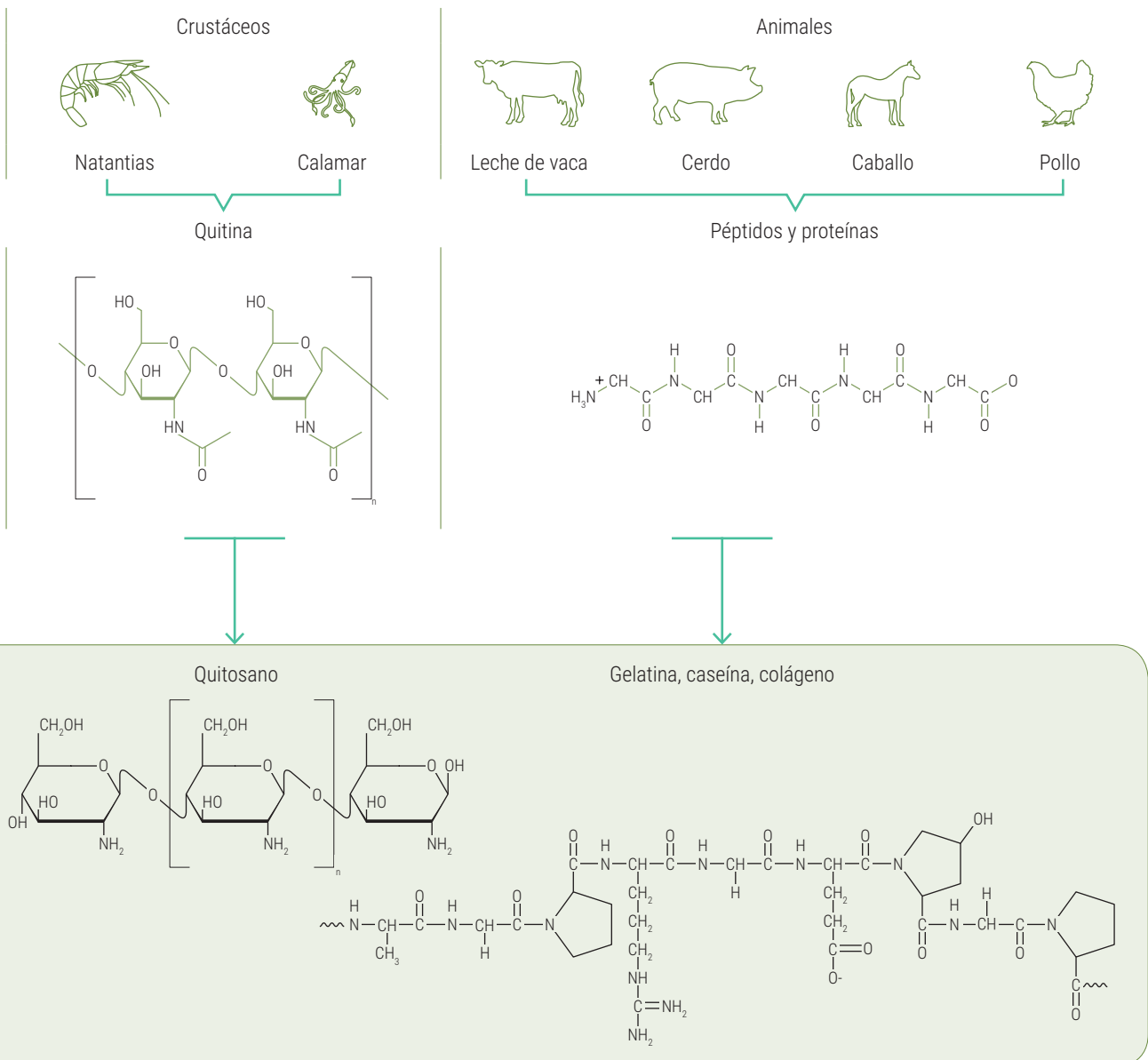


## Plásticos

Los plásticos son polímeros orgánicos que incluyen una amplia gama de materiales sintéticos o semisintéticos utilizados en aplicaciones como la ropa, los coches, los juguetes, los televisores, los ordenadores y otros productos. Generalmente son derivados del petróleo crudo, el carbón o el gas natural. Sin embargo, cantidades importantes de plásticos se desechan en el medio ambiente y se acumulan en los ecosistemas, entre otros, los sistemas de agua dulce y los océanos. Además,

los productos químicos se añaden a los plásticos en calidad de aditivos, como es el caso de los plastificantes, algunos de los cuales suscitan preocupación (véase más adelante) y pueden dificultar el reciclaje.

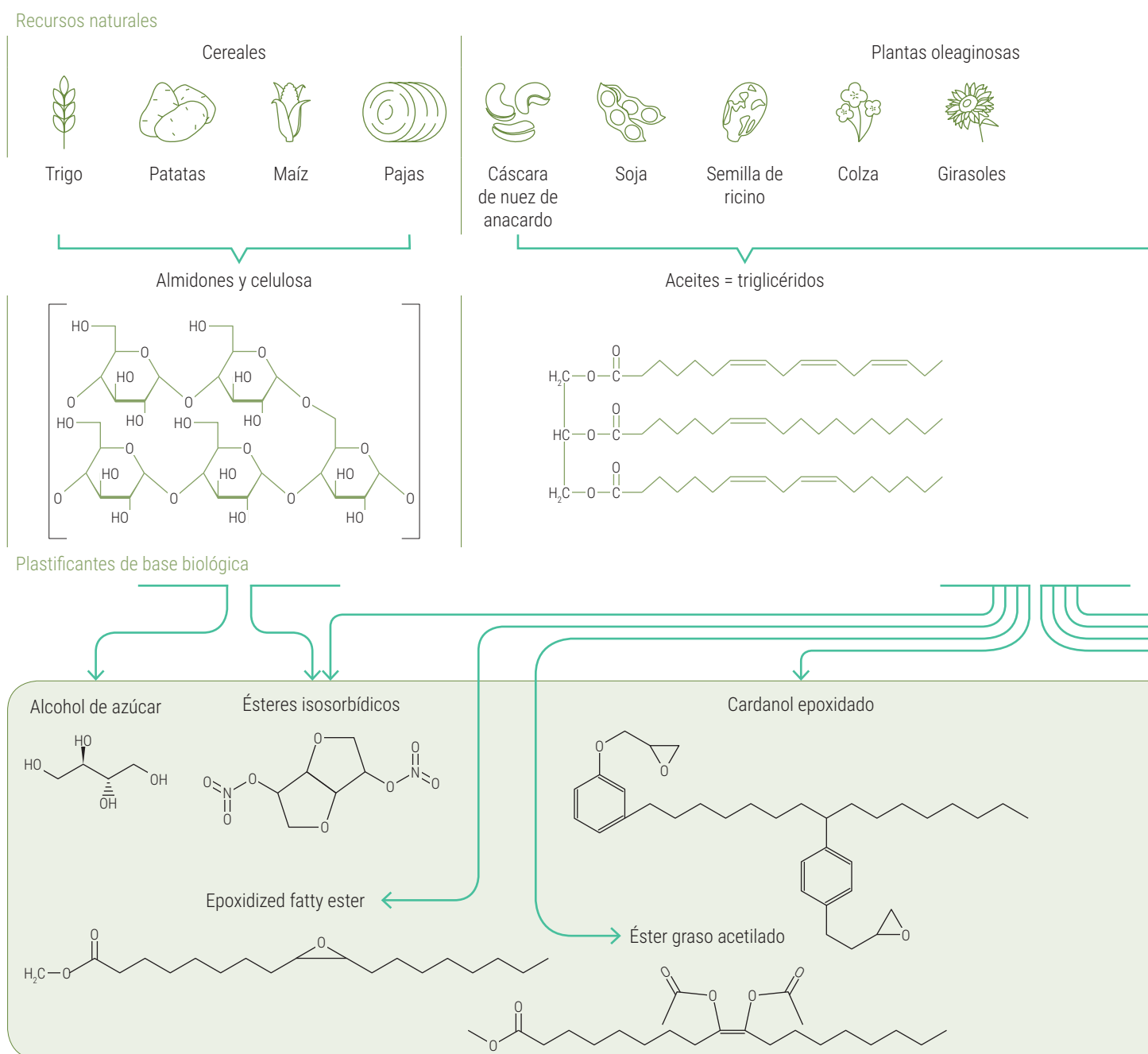
Los bioplásticos son materiales plásticos producidos a partir de fuentes renovables de biomasa, entre las que se cuentan los desechos agrícolas y los desperdicios de alimentos. Pueden tener su origen, en los cereales (por ejemplo, trigo, maíz, paja), otras plantas (algodón, astillas de madera, serrín, algas,



etc.) o la biomasa animal. Entre los plásticos de base biológica que se producen actualmente se incluyen plásticos a base de almidón, polihidroxialcanoatos (PHA), ácido poliláctico (PLA), celulosa o polímeros a base de proteínas (Karan *et al.* 2019). El ácido poliláctico (PLA), por ejemplo, es un poliéster alifático, termoplástico y biodegradable, obtenido del azúcar mediante fermentación, que puede sustituir al polietileno en varias aplicaciones, por ejemplo el embalaje.

Entre los bioplásticos se encuentran tanto los plásticos no degradables como biodegradables, y ambos tienen potencial para promover la sostenibilidad, si se cumplen determinadas condiciones. Los bioplásticos no degradables pueden, por ejemplo, desempeñar una función en el desarrollo de las infraestructuras sostenibles (por ejemplo, tuberías de alcantarillado, edificios, materiales de cubierta, superficies de carreteras, etc.) y, a largo plazo, funcionar como sumideros de

Figura 4.4: **Panorama general de algunos biopolímeros y su origen natural** (Bocqué *et al.* 2015, p. 21)

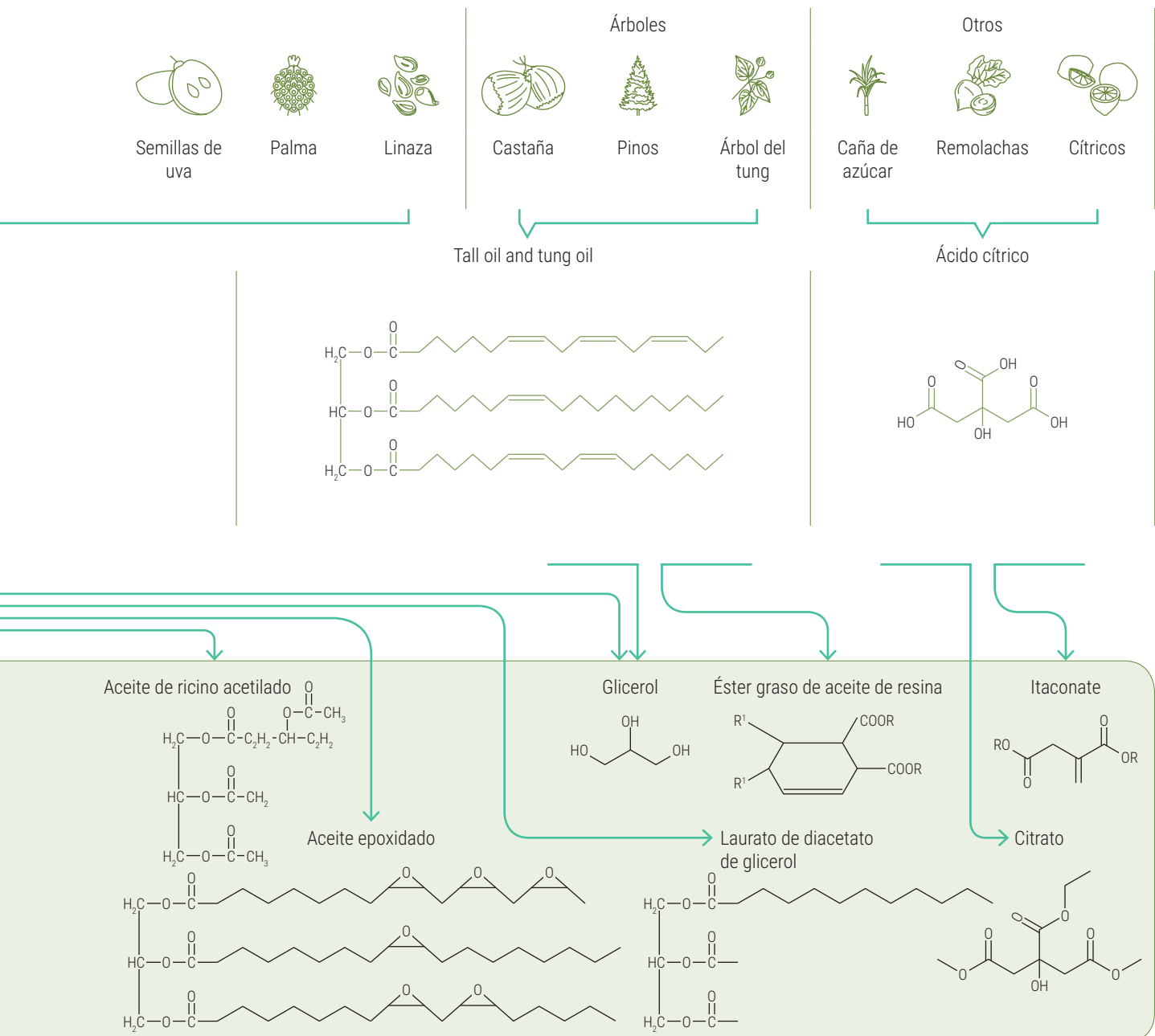




carbono. Una condición importante en relación con la sostenibilidad es que cuando estos materiales lleguen al término de su vida útil, esté garantizado su reciclaje (algo que no suele ocurrir).

Los bioplásticos degradables a veces se utilizan para productos que tienen una vida útil entre corta y media, y su durabilidad puede adaptarse a la finalidad del producto (Karan *et al.* 2019). Sin embargo, a menos que se den las condiciones

específicas y adecuadas para la biodegradación (por ejemplo, en una planta de compostaje), los plásticos biodegradables tampoco promueven la sostenibilidad. Un ejemplo son los plásticos biodegradables que terminan en el medio marino, donde no se degradan rápidamente. En la publicación del PNUMA titulada "Biodegradable Plastics and Marine Litter: Misconceptions, concerns and impacts on marine environments" (Kershaw 2015) se analiza a fondo esta cuestión.



## Plastificantes

Los plastificantes son productos químicos que se añaden a los plásticos para aumentar la flexibilidad de las mezclas poliméricas y mejorar su capacidad de transformación. Muchos plastificantes no suelen tener enlaces covalentes con los polímeros y, por lo tanto, pueden lixiviarse, dando lugar a la posible exposición humana y a la contaminación del medio ambiente (Jamarani *et al.* 2018). Ejemplo de ello son determinados plastificantes creados a partir de ésteres de ftalato, que pueden lixiviarse de los productos durante el uso y que se consideran que suscitan preocupación debido a sus posibles efectos adversos en la salud (por ejemplo, trastornos endocrinos). Su ubicuidad en el medio ambiente es una fuente adicional de preocupación (Benjamin *et al.* 2017).

Entre las innovaciones que promueven la sostenibilidad de los plastificantes se encuentran, entre otras, el diseño de plastificantes con bajas tasas de migración, baja volatilidad, sin efectos adversos para la salud y biodegradables. Los compuestos de di-benzoato de alquilo diol, por ejemplo, proporcionan muchas de las funciones del DEHP (ftalato de dietilhexílico), un plastificante que suscita preocupación y, según Erythropel *et al.* (2018), se degradan rápidamente en el suelo y tienen un perfil de baja toxicidad.

Al igual que otras moléculas funcionales, los plastificantes de base biológica pueden obtenerse de recursos agrícolas, como cereales, plantas oleaginosas, árboles, frutas y verduras o de sus desechos. Desde el punto de vista químico, estos recursos proporcionan estructuras adecuadas (poliol y poliéster), funcionalidad (moléculas difuncionales, trifuncionales, tetrafuncionales y pentafuncionales) y peso molecular (molecular, oligómero y polímero) (Bocque *et al.* 2015). Sin embargo, a pesar del potencial que tienen los plastificantes de base biológica, es necesario seguir investigando su coste, disponibilidad, toxicidad y efectos (Harmon and Otter 2017). Dado que el hecho de tener base biológica no implica necesariamente que no sean tóxicos, la generación de conocimientos más completos permitiría comprender mejor sus posibles oportunidades en cuanto a su sostenibilidad y compensaciones.

## Disolventes

Los disolventes tienen la función de disolver un soluto sólido, líquido o gaseoso. Aunque el agua es el disolvente más conocido, muchos disolventes son productos químicos orgánicos, como los alcoholes y los glicoles, el DMSO, el éter dietílico, el hexano, el tetracloroetano, el tolueno o el xileno. Se utilizan, por ejemplo, como agentes decapantes, en procesos de extracción, como agentes desengrasantes o como aditivos y diluyentes. Muchos disolventes orgánicos tienen propiedades peligrosas y son liberados al medio ambiente en cantidades significativas. Dependiendo de la naturaleza del disolvente, los posibles efectos en la salud pueden ser, entre otros, irritación en la piel, los ojos y los pulmones, dolor de cabeza, náuseas, mareos y aturdimiento, mientras que una exposición elevada puede causar inconsciencia e incluso la muerte (Health and Safety Executive 2003).

Para resolver la cuestión de los efectos de los disolventes, se ha prestado mucha atención al desarrollo de disolventes ecológicos y más sostenibles (Freire and Coutinho 2019; Sheldon 2019). Las esferas de innovación comprenden, por ejemplo, el desarrollo de disolventes no tóxicos a partir de desechos bióticos; el uso del agua como disolvente en la producción de productos farmacéuticos y otros productos químicos en lugar de disolventes orgánicos; la sustitución del tolueno por alternativas más seguras que cumplen la misma función; o el diseño de materiales de manera que no requieran disolventes (por ejemplo, nuevos materiales de construcción que no requieran pinturas ni revestimientos (van der Waals *et al.* 2018).

## Repelentes al agua, la grasa y la suciedad

Los repelentes al agua, la grasa y la suciedad son productos químicos que influyen en la resistencia a la absorción o al paso del agua, el aceite o la suciedad como resultado de la aplicación de un tratamiento con revestimiento para superficies. La mayoría de estos tratamientos se basan en productos fluoroquímicos. Las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) se han utilizado ampliamente por su repelencia

al agua, a la grasa y a la suciedad, así como por su resistencia a las temperaturas en diversas aplicaciones. Muchas PFAS son peligrosas para la salud humana, persistentes en el medio ambiente y las versiones de cadena más larga se bioacumulan en los organismos vivos. Las PFAS de cadena más corta son móviles en el medio ambiente y persistentes (PNUMA 2019b). Estas propiedades de las PFAS son motivo de preocupación, lo que crea oportunidades para la innovación en la química verde y sostenible.

Se ha desarrollado una gama de innovaciones para promover la sostenibilidad de los repelentes al agua, la grasa y la suciedad. La cromatogenia, por ejemplo, es un proceso de la química verde, sin disolventes, que confiere hidrofobicidad al papel y a los tabloncillos aplicando cloruro y ácidos grasos en estado líquido al papel. Las posibles aplicaciones comprenden el embalaje, los dispositivos médicos o las láminas técnicas. En la industria textil, las actividades en materia de innovación se centran en el desarrollo de repelentes al agua sostenibles para tejidos basados en biocarbono y sin hidrocarburo perfluorado (Inno4sd.net 2019) (Innovation for Sustainable Development Network 2019).

### Pirorretardantes

Los pirorretardantes comprenden un diverso grupo de productos químicos que se añaden a los materiales fabricados, como es el caso de los plásticos, los textiles, acabados de superficie o revestimientos para hacerlos resistentes al fuego. Varios pirorretardantes halogenados, es decir, pirorretardantes bromados y clorados, son motivo de preocupación por su persistencia, bioacumulación, transporte a larga distancia y toxicidad, lo que ha aumentado el uso de alternativas sin halógenos, como los compuestos organofosforados, aunque algunas de estas alternativas pueden plantear riesgos similares.

Los pirorretardantes que se generen a partir de fuentes biológicas tienen un potencial importante. Tienden a ser de bajo coste, pueden no ser tóxicos y son independientes de las fluctuaciones del mercado petroquímico (Howell *et al.* 2018a). Estos retardadores de base biológica se derivan, por ejemplo, del ácido tartárico (un subproducto de la industria vitícola), el quitosano (un subproducto de

la industria pesquera), el aceite de ricino (un aceite vegetal no comestible) y el isosorbida (un diol de diéter producido a partir del almidón) (Howell, Daniel and Ostrander 2018). Una innovación reciente es el uso del ácido gálico, que se encuentra habitualmente en las frutas, los frutos secos y las hojas; y del ácido 3,5-di-hidroxibenzoico del trigo sarraceno para producir retardadores de llama. Los grupos hidroxilos de estos compuestos se convierten en ésteres de fósforo retardadores de llama. A continuación, se les puede añadir resina epoxi, un polímero utilizado en la electrónica, los automóviles y los aviones (Howell, Oberdorfer and Ostrander 2018). Otra esfera de innovación que tiene grandes perspectivas es el desarrollo de nuevos sistemas pirorretardantes de base biológica a partir del ácido tánico (Laoutid *et al.* 2018).

### Surfactantes

Los surfactantes son productos químicos que se añaden a un líquido para reducir la tensión superficial, potenciando así las propiedades del producto como agente diseminador y humectante. Estas moléculas orgánicas anfífilas son adsorbidas en la interfaz y se autoagrupan o combinan en diferentes fases en una solución acuosa o no acuosa. Los surfactantes son componentes clave, por ejemplo, de los detergentes domésticos (p.ej., el polvo para lavar) y de los productos de limpieza del hogar (p.ej., el limpiador para pisos) o de los artículos para el cuidado personal (p.ej., el champú). Estos productos químicos pueden irritar los ojos, la piel y los pulmones, y algunos son alteradores endocrinos conocidos o se sospecha que lo sean, son tóxicos en el medio acuático y se bioacumulan (van der Waals *et al.*).

En química, las innovaciones para la promoción de la sostenibilidad de los surfactantes se conocen como “surfactantes verdes”, “surfactantes de base oleoquímica”, “surfactantes renovables”, “biosurfactantes” o “surfactantes naturales” (Bhadani *et al.* 2020). La gama de surfactantes alternativos verdes en el mercado es diversa e incluye, por ejemplo, alquilpoliglucósidos, saponinas de origen vegetal, derivados de aminoácidos y betaínas (SpecialChem 2015). A menudo, las moléculas surfactantes más respetuosas con el medio ambiente se derivan de

elementos constitutivos de la biomasa renovable (Bhadani *et al.* 2020). La betaína surfactante de algas, por ejemplo, se fabrica mediante la fermentación controlada de microalgas renovables (Business Wire 2015). Se utiliza en productos que requieren espumas, como champús, jabones líquidos o líquidos para fregar a mano.

Existen más oportunidades de innovar mediante la modificación de tecnologías y los métodos de mejora de las cepas microbianas (Kandasamy *et al.* 2019). Por ejemplo, un nuevo surfactante recién desarrollado mediante métodos biotecnológicos consiste en soforolípidos. Muestra buenas propiedades limpiadoras, no es agresivo para la piel y se degrada rápidamente en el medio ambiente (Bhadani *et al.* 2020).

### Conservantes químicos

Los conservantes químicos son productos químicos que se añaden a los productos para evitar su deterioro debido al crecimiento microbiano o a cambios químicos no deseados. Se utilizan ampliamente en productos alimenticios, bebidas, fármacos, pinturas, cosméticos, madera y otros productos. Dependiendo de su química, los conservantes pueden tener posibles efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Por ejemplo, se ha demostrado que algunos parabenos, a saber, el

butilparabeno y el propilparabeno, tienen posibles efectos endocrinos y propiedades estrogénicas (EC 2011). Los conservantes de formaldehído y los conservantes liberadores de formaldehído utilizados en champús y jabones líquidos para bebés son motivo de preocupación por sus propiedades carcinógenas y alérgicas (van der Waals *et al.* 2018).

Dado el contacto directo de muchos conservantes químicos con el cuerpo humano, es importante que la innovación química desarrolle conservantes químicos más seguros. Sin embargo, como los conservantes químicos son intrínsecamente antimicrobianos, encontrar un conservante químico que impida el crecimiento microbiano, pero no presente toxicidad supone un reto. Las investigaciones se centran en la identificación y el desarrollo de conservantes químicos que sean menos tóxicos, en comparación con los existentes en el mercado.

En un examen realizado recientemente desde la perspectiva de la química verde se compararon los conservantes químicos para diversas categorías de productos (Buckley *et al.* 2017). Se concluyó, por ejemplo, que el galato de octilo, un conservante alimentario, tiene mejor actividad antimicrobiana y plantea peligros de naturaleza química menores en comparación con los conservantes que se utilizan actualmente. Igualmente importante es la

#### Recuadro 4.2: Química verde y sostenible en la agricultura (Peabody O'Brien, Franjevic and Jones 2009)

El crecimiento de las poblaciones y la demanda de alimentos han llevado a un mayor uso de plaguicidas y fertilizantes en todo el mundo. Los plaguicidas altamente peligrosos suscitan especial preocupación en lo que se refiere a la salud humana y el medio ambiente. Asimismo, las escorrentías de fertilizantes están causando importantes problemas ambientales, en especial en los ecosistemas de agua dulce y de los océanos (UNEP 2019b). Por tanto, la química verde y sostenible tiene una importante función que desempeñar en la promoción de la sostenibilidad de la agricultura.

Peabody O'Brien, Franjevic and Jones (2009) plantean que la química verde y la agricultura sostenible están intrínsecamente interrelacionadas en, al menos, tres formas. La primera de ellas es que la química verde y sostenible es consumidora de insumos agrícolas tales como materias primas biológicas. Por tanto, los expertos en química verde necesitan que los agricultores practiquen una agricultura sostenible que proporcione materias primas de base biológica verdaderamente "verdes". La segunda es que las alternativas que ofrece la química verde pueden desempeñar una función importante en la producción de bienes agrícolas sin plaguicidas tóxicos ni otros productos químicos preocupantes. Y, por último, las innovaciones en la esfera de la química verde pueden contribuir a la restauración de las tierras mediante la eliminación de la contaminación química de los suelos relacionada con las prácticas agrícolas tradicionales.



posibilidad de utilizar conservantes naturales (por ejemplo, extracto de romero y orégano, lúpulo, sal, azúcar, vinagre, alcohol y otros). En algunos casos,

y para determinados productos, las estrategias de conservación alternativas pueden reducir la necesidad de utilizar conservantes químicos.

## 4.4 Oportunidades de innovación de procesos

---

### Catálisis

La catálisis es un proceso que aumenta la velocidad de una reacción química por adición de una sustancia denominada “catalizador”. El catalizador no se consume en la reacción y, por tanto, puede continuar actuando. Los catalizadores reducen la energía de activación (por ejemplo, el calor) necesaria para producir una reacción y, por lo tanto, garantizan una reacción de la materia prima más completa y su uso más eficaz. En la mayoría de los casos, solo se requieren pequeñas cantidades de un catalizador para variar la velocidad de reacción.

Los problemas con el uso de los catalizadores surgen cuando se utilizan materiales tóxicos en las reacciones o la catálisis requiere condiciones de reacción extremas que reducen el beneficio del catalizador. Algunas transformaciones orgánicas han utilizado, por ejemplo, catalizadores de metales de transición raros a base de paladio, rodio, rutenio e iridio. Aunque son muy eficaces, la disponibilidad de estos metales es limitada, son costosos y tienen propiedades tóxicas. Además, algunos procesos catalíticos requieren condiciones de reacción de alto consumo energético como calor o presión elevados. Encontrar catalizadores o procesos catalíticos más sostenibles podría ser la solución para diversos problemas de sostenibilidad y contribuiría al descubrimiento de las potencialidades de muchas innovaciones. Los enfoques dirigidos al logro de una catálisis más sostenible incluyen el desarrollo de catalizadores de baja toxicidad, procesos que requieran condiciones de reacción con menor consumo energético o catalizadores que puedan aprovechar las fuentes de energía renovables para las reacciones.

### Catálisis de metales abundantes en la tierra

Metales que abundan en la tierra incluyen elementos de transición de primera fila como el manganeso, el hierro, el cobalto, el níquel, el vanadio o el cromo (Chirik and Morris 2015) que tienen potencial para aumentar el uso sostenible de los catalizadores en las reacciones químicas (ACS 2015b). Ello ha llevado a investigaciones para desarrollar catalizadores homogéneos basados en complejos metálicos abundantes en la tierra y de baja toxicidad. Según la ACS, la catálisis de metales que abundan en la tierra “se promociona por su inherente sostenibilidad y por las ventajas relacionadas con su baja toxicidad y su mínimo impacto ambiental” (ACS 2020b). Los complejos basados en los metales de primera fila Fe, Co, Ni y Mn son especialmente atractivos (Chakraborty, Leitner and Milstein 2016).

Los metales que abundan en la tierra tienen también potencial para apoyar una variedad de transformaciones químicas mayor que los catalizadores utilizados tradicionalmente. Investigaciones recientes sobre innovación abarcan temas como, por ejemplo, el uso de los metales abundantes en la tierra en la síntesis de nanomateriales bien definidos para aumentar la actividad, para reducir la cantidad de metales nobles necesarios en una reacción o para la fotoactivación (Kaushik and Moores 2017). Otra prometedora aplicación consiste en usar el catalizador a base de hierro Fe-TAML® para la conversión de los contaminantes nocivos en sustancias menos tóxicas o inocuas, entre otros, los plaguicidas nocivos en los suelos (Platt 2004).

## Organocatálisis

La organocatálisis utiliza pequeñas moléculas orgánicas compuestas por carbono, hidrógeno, azufre y otros elementos no metálicos como catalizadores, las que abarcan aminos, urea, ácidos, alcoholes, especies halogenadas y carbenos, entre otros (Vitale *et al.* 2016). Los organocatalizadores pueden producirse a partir de desechos, con lo cual se cumplen los principios de una química verde y más sostenible (Meninno 2020). Sus ventajas son su disponibilidad, su bajo coste y su baja toxicidad. Los organocatalizadores también pueden trabajar en condiciones de reacción más suaves y menos peligrosas que muchos otros catalizadores.

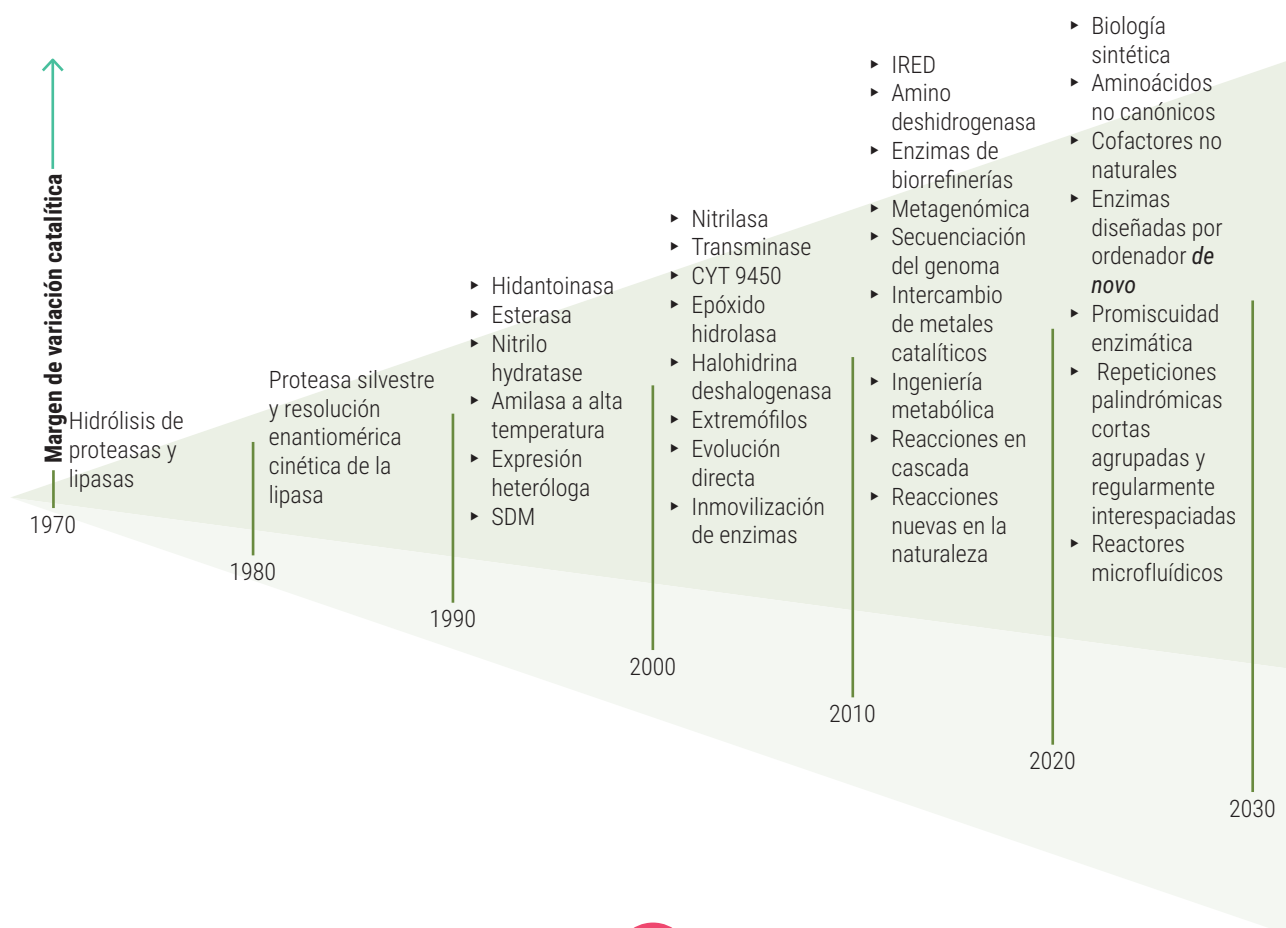
Las esferas de aplicación comprenden, por ejemplo, la síntesis orgánica y la síntesis de polímeros, así como la conversión de la biomasa para producir una diversidad de productos químicos, materiales y biocombustibles. Entre los ejemplos que pueden citarse en la esfera de la conversión de biomasa figuran la conversión de celulosa, glucosa y fructosa,

la mejora de los furaldehídos y la polimerización organocatalítica de materias primas de biomasa (Liu and Chen 2014).

## Biocatálisis

Las enzimas son catalizadores proteicos. Catalizan reacciones muy específicas y pueden modificarse para catalizar una reacción requerida. La biocatálisis utiliza enzimas para las reacciones, en condiciones moderadas, por ejemplo, a temperatura ambiente, lo que requiere poca complementación de energía externa. Otras ventajas comprenden aspectos como los siguientes: la mayoría de las enzimas utilizadas industrialmente no son peligrosas y son biodegradables. Las propiedades catalíticas de las enzimas permiten desarrollar nuevas tecnologías, como es el caso de la producción de moléculas quirales, productos químicos especializados y sustancias químicas comerciales. Las enzimas se producen a partir de recursos renovables poco costosos y sus costes son estables.

Figura 4.5: Alcance de la biocatálisis en la síntesis orgánica sostenible (Sheldon and Brady 2019, p. 2859)



La aplicación ampliada de la biocatálisis es posible gracias a la secuenciación de grandes números de genomas microbianos, junto con progresos realizados en la síntesis de genes, que permiten acceder a una amplia gama de enzimas silvestres (Sheldon and Woodley 2018). Las propiedades de las enzimas potencialmente interesantes pueden después ajustarse, con la ayuda de herramientas de evolución dirigida, para su encaje perfecto en un proceso predefinido. Por ejemplo, la producción biocatalítica de determinados productos farmacéuticos intermedios (por ejemplo, alcoholes y aminos enantiopuros) se ha convertido en una síntesis orgánica muy avanzada. Otra esfera de innovación con muchas perspectivas es el uso de enzimas en la producción de polímeros (Kobayashi, Uyama and Kadokawa 2019).

### Fotocatálisis

La fotocatálisis entraña la absorción de luz por una o más especies que reaccionan en presencia de un catalizador. Convierte la energía fotónica (por ejemplo, la radiación solar) en energía química mediante catálisis ante un elemento semiconductor, como es el caso del  $\text{TiO}_2$ , como fotocatalizador. La fotocatálisis tiene diversas aplicaciones, como la hidrólisis del agua para producir hidrógeno como combustible, la síntesis orgánica y la recuperación de efluentes contaminados (Ravelli *et al.* 2009). Sus aplicaciones específicas incluyen tecnologías para la promoción de la fotosíntesis artificial (en la que la radiación se utiliza para convertir  $\text{CO}_2$  en productos químicos orgánicos ricos en energía=, o la depuración de agua (en la que la radiación se utiliza para convertir los contaminantes tóxicos en productos químicos no tóxicos).

### 4.4.2 Procesamiento por lotes frente a procesamiento continuo

El procesamiento por lotes entraña el procesamiento de material a granel en grupos en una etapa específica del proceso de producción. Una alternativa al procesamiento por lotes es el procesamiento continuo, en el que los materiales reaccionan mientras el flujo circula a lo largo de un sistema de canales, tuberías o tubos. Según la

Oficina de Rendición de Cuentas del Gobierno de los Estados Unidos (2018), en el procesamiento continuo, los materiales se utilizan de manera más eficiente que en el procesamiento por lotes, se consume menos energía, la producción de desechos es menor, el consumo de disolventes es menor, los procesos son más seguros y se reduce la exposición a los productos químicos. Por lo tanto, la tecnología satisface muchos de los 12 Principios de la Química Verde.

### 4.4.3 Biorrefinerías

Una biorrefinería es una instalación que integra procesos y equipo de conversión de la biomasa para producir combustibles, energía y productos químicos con valor añadido a partir de la biomasa. La Agencia Internacional de Energía (AIE) define las biorrefinerías como el procesamiento sostenible de biomasa para su conversión en un espectro de productos de base biológica (alimentos, piensos, productos químicos, materiales) y bioenergía (biocombustibles, energía o calor) (Bell *et al.* 2014). Las biorrefinerías pueden desarrollar múltiples productos químicos mediante el fraccionamiento de biomasa en intermediarios (carbohidratos, proteínas, triglicéridos) que además pueden convertirse en productos valiosos.

Las esferas de innovación y los ejemplos del uso de biorrefinerías para promover la química verde y sostenible incluyen, entre otros (WUR n.d. b):

- ▼ La fermentación de la glucosa para obtener ácido succínico que sustituye a materias primas derivadas del petróleo y utiliza mucha menos energía que los métodos de producción tradicionales, y que tiene aplicaciones en poliuretanos, pinturas, revestimientos, adhesivos, productos farmacéuticos y otros.
- ▼ La conversión de componentes a partir de sustratos de bajo coste y flujos secundarios en fuentes de energía como el hidrógeno.
- ▼ El desarrollo de microalgas que utilizan la luz solar y el  $\text{CO}_2$  como fuentes de energía y carbono para producir aceites y biodiésel de alta calidad, entre otros productos.

Cuadro 4.1: Comparación de un reactor de ingeniería química con un fermentador (Verster *et al.* 2014, p. 95)

Reactor de ingeniería química	Fermentador típico	Consecuencias para la ingeniería de fermentadores
Mezcla reactiva simple	Complejidad de la mezcla reactiva	Influye en el procesamiento y la purificación en las fases posteriores, puede afectar el funcionamiento catalítico (“envenenamiento” del catalizador o inhibición de la retroalimentación)
Alta concentración de reactivos y productos	Baja concentración de reactivos y productos	Masa ineficiente y transferencia de calor
Aumento del producto con reducción de sustrato	Aumento de biomasa al mismo tiempo que se hacen progresos en la transformación bioquímica	Influye en el procesamiento en las fases posteriores y en la purificación, optimización de la productividad no lineal
Es preciso añadir un catalizador al sistema, podría tener una vida útil catalítica limitada	Los microorganismos sintetizan sus propios catalizadores (enzimas) - “regeneración” del catalizador	En un sistema bien diseñado, los progresos se pueden autorreproducir / autoorganizar
Condiciones de reacción extrema	Condiciones de reacción moderada (temperatura, pH)	Tiene potencial para ser un proceso más seguro, que requiera menos energía. Puede ser difícil establecer un gradiente de enfriamiento

### Microrreactores

Los microrreactores –también denominados reactores microestructurados o reactores de microcanales– son dispositivos en los que tienen lugar las reacciones de la química de flujo en un ámbito restringido de dimensiones a menudo inferiores a 1 mm. La tecnología de microrreactores y la química de flujo tienen potencial para

desempeñar una función importante en el desarrollo de la síntesis verde y sostenible. La tecnología conserva la economía del átomo, utiliza disolventes y auxiliares más seguros, crea menos desechos y permite realizar análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación, lo que, en definitiva, proporciona una química intrínsecamente más segura (Fanelli *et al.* 2017).

## 4.5 Oportunidades de digitalización para fomentar la química verde y sostenible

La digitalización y las tecnologías de la información modernas tienen un potencial importante para promover la innovación en la química verde y sostenible, cuando se realicen evaluaciones de la sostenibilidad sólidas. En la fabricación de productos químicos, por ejemplo, la generación y el análisis de grandes conjuntos de datos permiten obtener mayores rendimientos y volúmenes, reducir el consumo de energía y la contaminación y fomentar un mantenimiento eficaz (Fermeglia,

Longo and Toma 2009). En el caso de muchas operaciones químicas, estos beneficios pueden lograrse mediante el uso y la mejora de la tecnología de la información y los sistemas de control de procesos existentes (PNUMA 2019b).

La digitalización también propicia una experimentación más rápida y el descubrimiento de nuevas moléculas a un coste menor que el que se logra en laboratorio (Davies *et al.* 2016).



Los programas informáticos avanzados permiten examinar las moléculas químicas de varias propiedades peligrosas, lo que permite reducir considerablemente los ensayos con animales (Pradeep, Friedman and Judson 2020). La innovación en programas informáticos, combinada con la moderna tecnología informática, también ayudan a examinar el espacio de los productos químicos –alrededor de 1060 moléculas en total (Kirkpatrick and Ellis 2004)– y a crear moléculas con las propiedades requeridas pertinentes para el desarrollo de materiales sostenibles y la consecución de los objetivos de sostenibilidad.

La agricultura es un sector de la importación en el que las soluciones basadas en las tecnologías de la información tienen particular potencial para promover la sostenibilidad (King 2017). Los robots y los drones pueden detectar las plagas en una fase temprana de los brotes, lo que permite usar con precisión los plaguicidas, minimizando considerablemente su utilización. Con estas tecnologías también se reúnen otros datos pertinentes para el fomento de la sostenibilidad, incluidos los relativos al uso eficiente de los fertilizantes (minimizando así sus pérdidas en el medio ambiente) y reduciendo al mínimo el uso de los escasos recursos hídricos.

## 4.6 Potencial de innovación en química verde y sostenible en un sector: el ejemplo de la energía

---

### Oportunidades para la química verde y sostenible en sectores clave

La innovación en esta esfera tiene potencial para impulsar la sostenibilidad en importantes sectores de la economía. Ello incluye, entre otros, al sector de la energía, del transporte, de la agricultura, el sector textil y el del turismo. Dada la importancia del sector energético para abordar el cambio climático, se hace una breve introducción para ilustrar cuán pertinente es la química verde y sostenible para el sector y la manera en que puede lograr un cambio en la estructuración de la transformación sostenible a nivel sectorial.

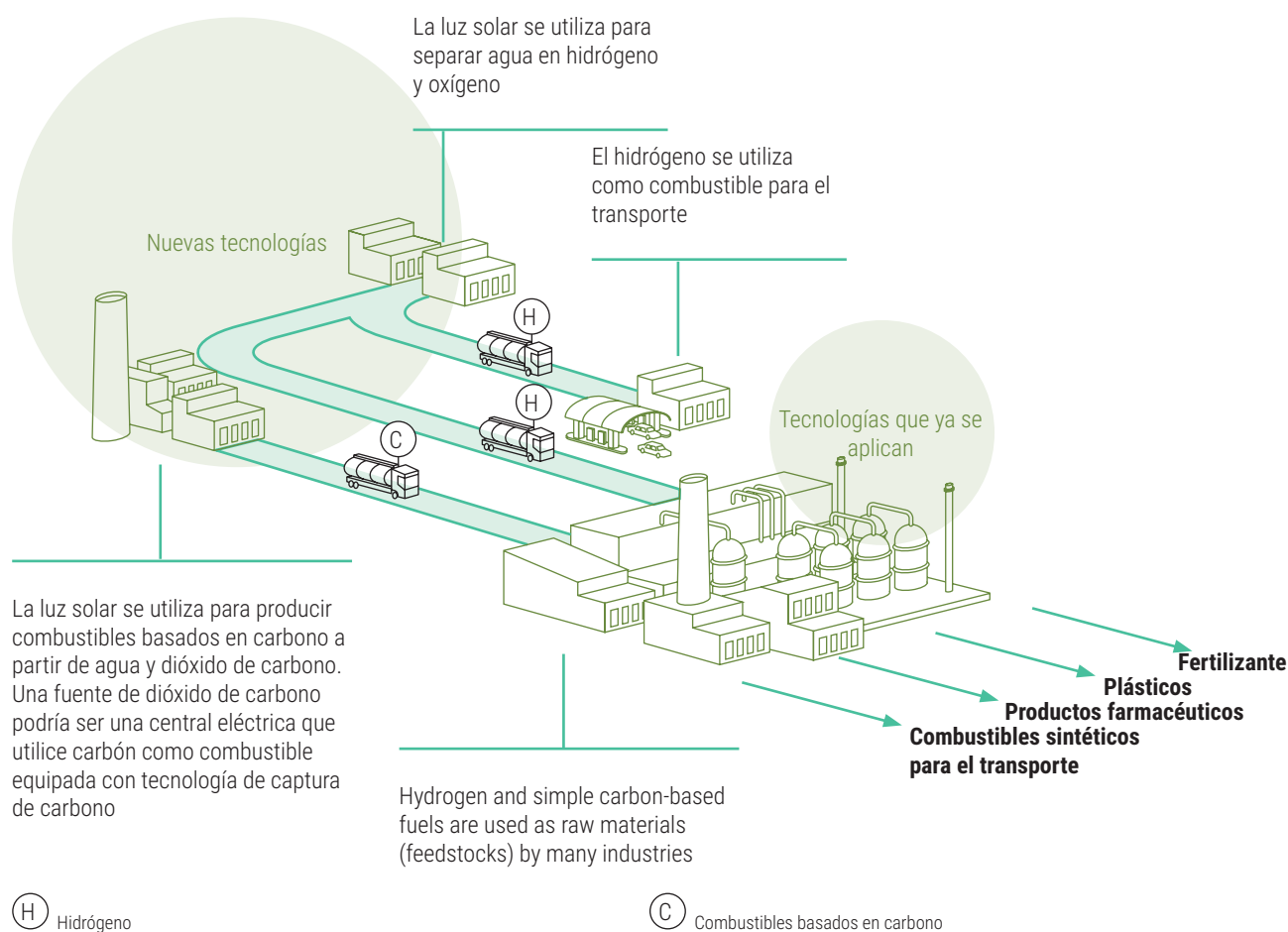
### Aumento de la eficiencia energética mediante la innovación química

El sexto principio de la química verde establece que se reconozcan las necesidades energéticas por su impacto ambiental y económico y que se reduzcan al mínimo. Los métodos sintéticos deberían ponerse en práctica, de ser posible, a temperatura y presión ambiente (Anastas and Warner 1998). Aunque la industria química ha dado pasos importantes para

ahorrar energía en la producción de productos químicos, es difícil lograr mayores avances con medidas para el aumento de la eficiencia en los procesos, lo que apunta a la necesidad de una disrupción tecnológica que se base en reacciones de la química verde que no tienen un consumo energético tan alto. Conceptos disruptivos tales como síntesis electroquímica y otros técnicos catalíticos innovadoras se están investigando para reemplazar métodos tradicionales termoquímicos con procesos más suaves y menos energéticamente intensos. Técnicas de separación pasivo usando membranas ya están superando métodos exigentes de separación tradición en la rentabilidad y rendimiento. Nuevos conceptos de tecnologías sostenible que producen productos químicos y energía simultáneamente surgen en el horizonte. Apoyo y desarrollo continuos de estas tecnologías será necesario para comercializar estas innovaciones y lograr una industria química eficiente energéticamente, segura y flexible.

Aparte de las innovaciones en los procesos, las innovaciones en la química tienen un importante potencial para aumentar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto

Figura 4.6: Como podría ser la producción de combustibles solares (Royal Society of Chemistry 2020)



invernadero mediante el desarrollo de nuevos productos y materiales. Algunos ejemplos son los materiales compuestos ligeros y reciclables que contribuyen a reducir el consumo de energía gracias a su menor peso. Sus aplicaciones son múltiples e incluyen la movilidad (aviones, coches), la generación de energía mediante molinos de viento y otras.

Otra esfera es el desarrollo de materiales de construcción eficientes desde el punto de vista del uso de la energía. Por ejemplo, el aerogel de celulosa (CA) aislado a partir de los desechos de tallos de té (TSW) es un buen material termoaislante y piroretardante. Es inocuo para el medio ambiente, térmicamente estable y puede producirse a bajo coste (Kaya and Tabak 2020). El reto que tiene ante sí la química verde y sostenible es desarrollar materiales de alto rendimiento y garantizar que no sean tóxicos y sean reciclables. Por lo tanto,

los “materiales ecológicos” promovidos por su potencial para el ahorro energético tienen que ser analizados a partir de los criterios de la química verde y de criterios de sostenibilidad, antes de que puedan considerarse más sostenibles.

### Desarrollo de combustibles solares mediante innovación química

Los combustibles solares comprenden tecnologías que utilizan la luz solar para producir moléculas valiosas como el hidrógeno y el metanol a partir del agua y el dióxido de carbono. La novedad de este enfoque estriba en el uso directo de la energía solar para producir productos químicos ya conocidos y ampliamente utilizados a partir de agua y dióxido de carbono. El concepto incluye los combustibles para el transporte y la generación de electricidad, así como las materias primas químicas para producir

productos petroquímicos, fertilizantes, plásticos y productos farmacéuticos. Se espera que los prototipos comerciales estarán disponibles dentro de 10 a 15 años (Royal Society of Chemistry 2020).

La fotosíntesis artificial es un proceso químico que imita el proceso natural de la fotosíntesis para convertir la luz solar, el agua y el dióxido de carbono en carbohidratos y oxígeno. Ello hace posible utilizar el dióxido de carbono excedente para almacenar energía solar en forma de enlaces químicos. Los químicos ya han tenido éxito en la producción de combustibles mediante la fotosíntesis artificial (ScienceDaily 2019).

Las esferas de innovación en la conversión de la radiación solar y el CO<sub>2</sub> en valiosas moléculas orgánicas son: la separación fotocatalítica de agua para convertirla en hidrógeno y oxígeno (electrólisis), un importante tema de investigación en la fotosíntesis artificial; la absorción de CO<sub>2</sub> fotoinducida, que reproduce la fijación natural de carbono; el diseño y montaje de dispositivos para la producción directa de combustibles solares, la fotoelectroquímica y su aplicación en pilas de combustible; y la ingeniería de enzimas y los microorganismos fotoautótrofos para la producción de microorganismos para biocombustibles e hidrógeno a partir de la luz solar.

### **Mejora de la generación de energía fotovoltaica mediante innovación química**

La innovación química también desempeña una función en el fomento de la energía solar fotovoltaica de varias maneras; las tecnologías solares fotovoltaicas orgánicas y de sensibilización por colorantes ofrecen la posibilidad de desarrollar paneles solares ligeros, flexibles, coloreados y baratos; los nuevos materiales para tejas solares protegen las viviendas y, al mismo tiempo, generan electricidad; las nuevas tintas de silicio

pueden aumentar la eficiencia de las células solares; y los materiales alternativos y las técnicas de recuperación de materiales (por ejemplo, para los fotovoltaicos de silicio) ayudan a reducir la dependencia de materias primas críticas como los metales raros (European Technology Platform for Sustainable Chemistry [SusChem] 2019)..

### **Mejora del almacenamiento de energía mediante innovación química**

Las baterías tienen potencial para proporcionar a la sociedad un suministro constante de energía generada a partir de fuentes renovables. Sin embargo, muchas baterías todavía contienen metales tóxicos como el aluminio, el cadmio, el mercurio, el níquel, el plomo, el hierro, el zinc, el calcio, el magnesio y el litio. En el caso del litio, que desempeña una función fundamental en la ampliación de las aplicaciones en vehículos eléctricos y redes eléctricas, existen riesgos de posible escasez de suministros, así como problemas de reciclaje y eliminación.

Las innovaciones químicas tienen potencial para mejorar la seguridad, la fiabilidad, la durabilidad y la reciclabilidad de las baterías. Los temas sobre innovaciones incluyen, por ejemplo, nuevos materiales para las baterías de iones de litio; baterías de flujo redox; baterías metal-aire; baterías orgánicas y materiales para el almacenamiento de energía térmica y termosolar de gran capacidad. Una de las esferas con mayores perspectivas son las nuevas sustancias químicas que abordan cationes monovalentes (K<sub>+</sub>, Na<sub>+</sub>) o divalentes (Mg<sub>2+</sub> y Ca<sub>2+</sub>), así como las tecnologías para el reciclaje eficaz del litio. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, una alternativa al metal litio interesante es el sodio y sus sales de sodio (PF6<sup>-</sup>, TFSI<sup>-</sup>, FSI<sup>-</sup>), que son menos tóxicos que sus homólogos de litio (Larcher and Tarascon 2015).







# POLÍTICAS, HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS DE FACILITACIÓN PARA PROMOVER LA QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBLE >

- 5.1 Función de las políticas, las herramientas y los instrumentos de facilitación en la promoción de la química verde y sostenible 60
- 5.2 Políticas, medidas reglamentarias y establecimiento de normas 60
- 5.3 Enfoques de evaluación del ciclo de vida y de diseño sostenible 63
- 5.4 Programas de intercambio de conocimientos y de premiación 65
- 5.5 Apoyo a los enfoques y los principios normativos 67
- 5.6 Integración de la química verde y sostenible en la gobernanza empresarial 69

## 5.1 Función de las políticas, las herramientas y los instrumentos de facilitación en la promoción de la química verde y sostenible

---

Aunque el mercado de la química verde y sostenible está creciendo, es preciso fomentar las innovaciones correspondientes para aumentar sus cuotas de mercado. Este capítulo presenta las políticas, herramientas e instrumentos que pueden contribuir a crear las condiciones propicias necesarias. Comprenden desde las medidas reglamentarias y el establecimiento de normas hasta las herramientas y los enfoques de evaluación, el fortalecimiento de la gobernanza empresarial, así como el intercambio de conocimientos y programas de premios. Una cuestión importante pertinente para todas las políticas, herramientas e instrumentos es cómo lograr que se tengan en cuenta plena y sistemáticamente consideraciones relativas a la química verde y sostenible en la formulación y aplicación de todos ellos. El capítulo 6 tratará los sectores y programas de facilitación más estratégicos. Juntos, ambos capítulos ofrecen un conjunto de medidas de facilitación dirigidas a acelerar la innovación en la química verde y sostenible y su desempeño en el mercado.

## 5.2 Políticas, medidas reglamentarias y establecimiento de normas

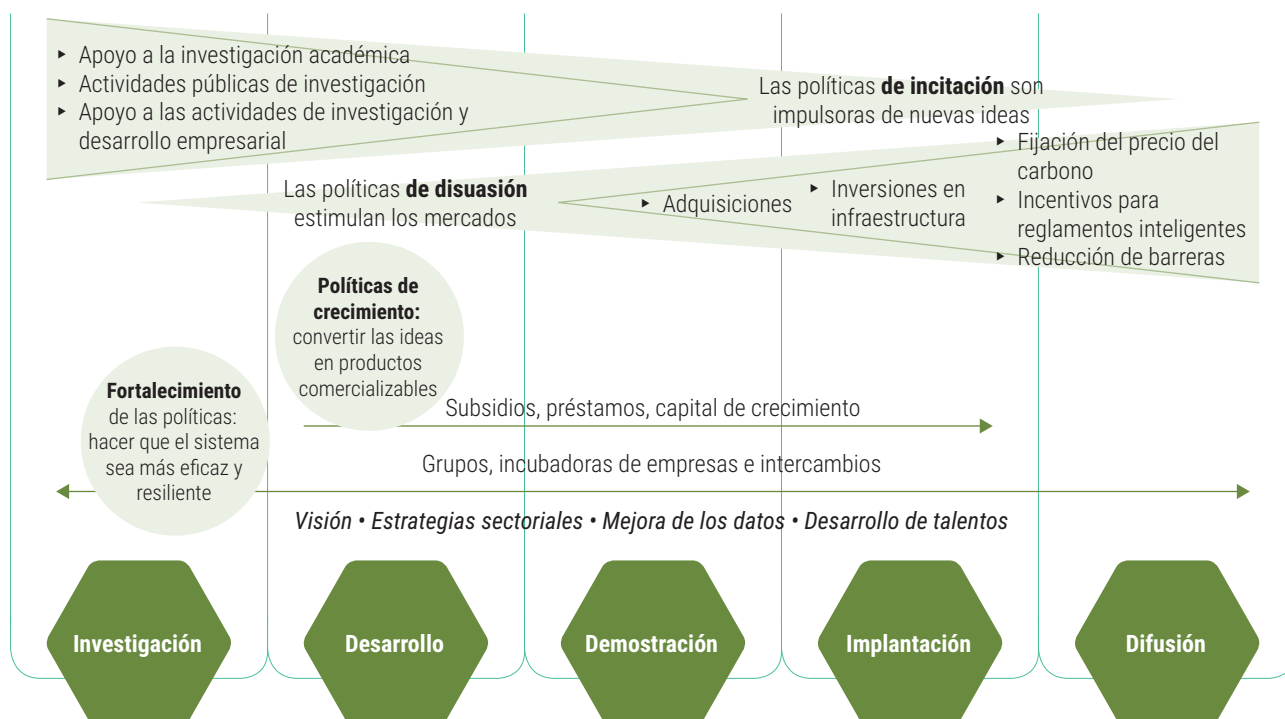
---

### Políticas de incitación y disuasión

Las políticas o intervenciones dirigidas a fomentar la innovación pueden clasificarse en cuatro categorías: 1) políticas de incitación que impulsen ideas nuevas; 2) políticas de disuasión que contribuyan a estimular la demanda en el mercado; 3) desarrollo de políticas que contribuyan a convertir las ideas en productos comercializables; y 4) fortalecimiento de las políticas relacionadas con el sistema de innovación limpia, haciéndolo más eficaz y resiliente (Elgie and Brownlee 2017). Otras características de los instrumentos de políticas que desempeñan una función son, a saber, la rigurosidad, la previsibilidad y la flexibilidad.

Aunque se trata de una categorización general, este marco ilustra cómo las intervenciones públicas coherentes y documentadas que sean conscientes de la cultura en la que funcionan pueden estructurarse para orientar los diferentes elementos del sistema de innovación en una dirección que fomente la innovación en la química verde y sostenible. La Estrategia Nacional de Bioeconomía de Alemania es un ejemplo de las estrategias que ofrecen una amplia gama de políticas que abarcan tanto medidas de incitación como de disuasión. En ella se enumeran medidas de implementación que toman como base la Estrategia Nacional de Investigación 'BioEconomía 2030' y la Estrategia Nacional de Políticas sobre

Figura 5.1: **Intervenciones normativas que propician la innovación tecnológica** (adaptado de Elgie and Brownlee 2017, p. 15)



Bioeconomía para agrupar las distintas vertientes políticas en un marco coherente (German Ministry of Education and Research and German Ministry of Food and Agriculture 2020).

### Políticas públicas para estimular la sustitución y la innovación en química verde y sostenible

La determinación de los productos químicos o de los grupos de productos químicos de interés, el establecimiento de límites explícitos para usos seleccionados y la definición de los objetivos de sustitución por las autoridades públicas pueden impulsar innovaciones voluntarias pioneras. En Europa, la inclusión de las sustancias que suscitan gran preocupación (SEP) en la lista en estudio para la inscripción de sustancias que requieren autorización con arreglo al anexo XIV de REACH reflejó la intención del regulador de adoptar medidas de gestión de riesgos (European Chemicals Agency 2011). Esta medida incentiva a la industria para que priorice las actividades de sustitución. Hoffman-La Roche, por ejemplo, ha implementado un programa de medidas sustitutivas para cumplir

con REACH antes de los plazos reglamentarios, evaluando y probando alternativas (Buxton 2016).

A nivel mundial, el Convenio de Estocolmo constituye un estímulo a la innovación al enumerar los productos químicos orgánicos persistentes y los contaminantes respecto de los cuales existen acuerdos a nivel mundial para su eliminación. Lo mismo ocurre en el caso del Convenio de Minamata sobre el Mercurio. Sin embargo, estos acuerdos mundiales solo abarcan un número limitado de productos químicos que son motivo de preocupación. Para ampliar y profundizar su marco normativo de impulso a la innovación, la Comisión Europea publicó, en octubre de 2020, una estrategia en el ámbito de las sustancias químicas con vistas a la sostenibilidad que forma parte de la ambición de la UE de contaminación cero, compromiso clave del Pacto Verde Europeo. La Estrategia está orientada a proteger mejor a los ciudadanos y al medio ambiente y a impulsar la innovación en el desarrollo de alternativas seguras y sostenibles (EC 2019).

Las políticas públicas también pueden tener un carácter facilitador. En los Estados Unidos, la

Ley de Desarrollo e Investigaciones de Química Sostenible, de 2019, aprobada en julio de 2020 en el Senado de los Estados Unidos, prevé convocar una entidad interinstitucional subordinada al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para que coordine los programas y las actividades federales de apoyo a la química sostenible. Las partes que integran la entidad llevan a cabo actividades necesarias para apoyar la química sostenible, incluida la incorporación de la química sostenible en los programas de investigación, desarrollo, demostración, transferencia de tecnología, comercialización, educación y formación existentes (Lipinski 2019). La entidad debe crear una hoja de ruta a la química sostenible en un plazo de dos años a partir de la fecha de promulgación. Como primer paso, la entidad consultará a los interesados pertinentes, entre ellos, los interesados a nivel internacional, con vistas a formular una definición del término química sostenible.

### Etiquetado, certificación y transparencia

Facilitar el acceso a los trabajadores, los ciudadanos, los consumidores y otros interesados a distintos tipos de información no solo les ayuda a tomar las medidas de protección necesarias, también moldea la demanda de productos químicos y productos en general más seguros y sostenibles.

Las etiquetas y los sistemas de certificación, así como el requisito de enumerar los ingredientes, sirven para que el público pueda identificar las sustancias químicas y los productos más seguros y sostenibles, siempre y cuando la información se presente de forma transparente y sea fiable, clara, pertinente y accesible. La aplicación del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA) es una medida importante para la comunicación de los peligros químicos y las medidas de protección necesarias que deben adoptar los trabajadores y los consumidores. Es importante que la información sea fácilmente accesible en el momento y el lugar en que el consumidor la necesite, durante la investigación de las opciones que se le ofrecen para comprar, y en el punto de compra y uso (UNEP 2017a).

Las nuevas herramientas de información, como las aplicaciones de los teléfonos inteligentes

que enlazan con iniciativas reglamentarias y publicaciones de informes de los consumidores, también están surgiendo como valiosas herramientas de información a los consumidores. Las aplicaciones ToxFox y AskReach, por ejemplo, señalan a la atención los productos químicos que figuran en la lista en estudio de REACH, lo que ayuda a los usuarios a tomar decisiones documentadas y a crear una demanda de productos no tóxicos y sostenibles.

Las políticas de facilitación, como el derecho a saber de los trabajadores, los consumidores y las comunidades, la participación del público y el acceso a la justicia, junto con las tecnologías innovadoras, pueden ser fuerzas motrices del avance de la química verde y sostenible. Algunos ejemplos incluyen, "The Convention on Access to Information", "Public Participation in Decision-making" y "Access to Justice in Environmental Matters" además existe el "Acuerdo Regional Sobre El Acceso a la Información, La Participación Pública y El Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y El Caribe.

Para un examen detallado de este tema, sírvase consultar el capítulo 8 de la Parte IV de Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial II.

### Participación Pública y Compromiso de las Partes Interesadas

Participación pública efectiva para la toma de decisiones relacionados con químicos y productos sigue siendo crucial para asegurar la protección medioambiental, la gestión segura de químicos y residuos y consumición y producción sostenibles. Es necesario que se garantice la participación pública en la toma de decisiones con respecto al proyectos, planes, programas y políticas y legislaciones. Por ejemplo, se alienta a los operadores de proyectos a identificar el público que está relacionado con la actividad (no solo comunidades locales sino ONGs que trata en protección ambiental), para involucrarles en la toma de decisiones y para proveer información en relación de los objetivos antes de solicitar un permite. Además, se aplica cuando el operador industrial desea que cambie o actualice las condiciones de funcionamiento de la actividad.



## 5.3 Enfoques de evaluación del ciclo de vida y de diseño sostenible

### Métodos de evaluación y enfoque de ciclo de vida

Los enfoques de ciclo de vida ayudan a los científicos, los desarrolladores y los gestores de productos a comprender las posibles repercusiones de un producto durante las numerosas etapas de producción, uso y término de su vida útil. La Organización Internacional de Normalización (ISO) define la evaluación del ciclo de vida (LCA) como la compilación y evaluación de los insumos, los productos y los posibles impactos ambientales de un sistema de productos a lo largo de su ciclo de vida (ISO 2016). La evaluación y la gestión de los productos químicos a lo largo de todos los ciclos de vida de los productos químicos y los productos en general permite comparar el desempeño ambiental de referencia de los productos con los objetivos de reducción de la contaminación y la exposición (Fantke and Illner 2019). La evaluación del ciclo de vida también ayuda a evitar que la carga se desplace de una etapa del ciclo de vida a otra (por ejemplo, la reducción de la extracción de materias primas mediante el reciclaje a expensas del aumento de los desechos de contaminantes en los reciclados) (Hellweg and Milà i Canals 2014).

La evaluación del ciclo de vida abarca las repercusiones para la salud humana y las derivadas de la toxicidad y la contaminación vinculada al producto (Arvidsson et al. 2018). Para evaluar las repercusiones sociales con mayor profundidad, se puede usar el Análisis del Ciclo de Vida Social (SLCA) (Andrews et al. 2009), mientras que la Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida comprende las tres dimensiones del desarrollo sostenible: la dimensión ambiental, la social y la económica (Guinée 2016; UNEP 2020)

Los métodos para la evaluación del ciclo de vida proporcionan información valiosa para la adopción de decisiones, pero pueden requerir muchos recursos y conjuntos de datos difíciles de obtener. Las evaluaciones del ciclo de vida también se enfrentan a problemas cuando se evalúan los riesgos químicos y las repercusiones en la salud humana y el medio ambiente durante las distintas etapas del ciclo de vida de un producto, y también cuando se evalúa la reciclabilidad de los materiales. La serie de normas ISO 14000 contiene un conjunto de principios ampliamente aceptados para la realización de evaluaciones de ciclo de vida. Sin embargo, algunas partes están sujetas

#### Recuadro 5.1: La Iniciativa del Ciclo de Vida (UNEP 2020)

La Iniciativa del Ciclo de Vida es una alianza entre el sector público y el privado de múltiples interesados que facilita el uso, a nivel mundial, de conocimientos creíbles sobre el ciclo de vida por los responsables de la adopción de decisiones en el sector público y el privado. Acogida por el PNUMA, la Iniciativa del Ciclo de Vida se ubica en la interfaz usuarios-expertos de los enfoques de ciclo de vida. Sirve de foro mundial que vela por un proceso de formación de consenso fundamentado en la ciencia para apoyar las decisiones y políticas favorables a la visión común de la sostenibilidad como un bien público. Emite opiniones autorizadas sobre herramientas y enfoques racionales mediante la participación en asociaciones de múltiples interesados (incluidos los Gobiernos, empresas y organizaciones científicas y de la sociedad civil). La Iniciativa facilita la aplicación de conocimientos sobre el ciclo de vida en el marco de la agenda mundial de desarrollo sostenible para alcanzar los objetivos más rápida y más eficientemente a nivel mundial.

a interpretación, como en el caso de la definición de los límites de los análisis. En consecuencia, diferentes análisis de ciclo de vida pueden arrojar diferentes resultados, lo que constituye un problema a la hora de realizar la comparación.

Teniendo en cuenta algunas de las limitaciones anteriores, el concepto de enfoque de ciclo de vida ha sido promovido y utilizado, por ejemplo, por el Consejo Nacional de Investigaciones de los Estados Unidos en su guía sobre la selección de alternativas químicas (US National Research Council 2014). El enfoque de ciclo de vida es un enfoque flexible que incluye el análisis cualitativo que ayuda a detectar las potenciales compensaciones, sin que se haya hecho la evaluación cuantitativa por medio de una evaluación del ciclo de vida.

### “Alternative Assessments” para químicos de preocupación

“Alternative assessment” proporciona un enfoque sistemático que permite la evaluación de químicos, procesos y diseños alternativos a varios químicos preocupantes. Al ser sistemática, se dirige hacia compuestos, materiales y productos más seguros y sostenibles, y minimiza el potencial de las consecuencias indeseadas (UNEP2019b). Los conocimientos y las habilidades necesarias para hacer “alternatives assessment” – toxicología, ingeniería, salud y seguridad – son complementarias a los de química sostenible y se pueden incorporar al diseño de químicos nuevos.

El enfoque interdisciplinario involucrado en “alternatives assessment” asegura que está considerando seriamente las diferencias y los compromisos potenciales de una alternativa y de un químico de preocupación en las etapas de fabricación, utilización y final-de-vida y ayuda así a la identificación de oportunidades para la reducción de los impactos ambientales y la implementación de métodos de química sostenible. Por ejemplo, Micelio, la estructura de raíces vegetativa de un hongo, es una solución de química verde que está usado para hacer embalaje sostenible y otros materiales. Sin embargo, por otro lado, la exposición al Micelio vivo durante su fabricación puede resultar en una exposición a alérgenos si el proceso no está bien controlado.

La falta de comprensión de consideraciones ambientales, de salud y de seguridad entre químicos y diseñadores en el desarrollo de tecnologías nuevas, especialmente en la academia y en las empresas pequeñas puede resultar en exposiciones problemáticas. Para apoyar “alternatives assessments” que son compatibles con la química verde y sostenible, hay una abundancia de recursos e informaciones disponibles (UNEP 2019b). Un ejemplo es el la pagina web para la transición a alternativas mas seguras administradas por el departamento de salud y seguridad laboral de los Estados Unidos que proporciona metodos que pueden ser usados por empresas pequeñas para identificar y evaluar los compromisos potenciales asociados con ciertas alternativas.

### Gestión sostenible de materiales

La gestión sostenible de materiales es un “enfoque sistémico de utilización y reutilización de los materiales de forma más productiva a lo largo de todos sus ciclos de vida”. Cuando se analiza el ciclo de vida completo de un producto, se pueden determinar oportunidades para reducir los impactos ambientales, conservar los recursos y disminuir los costes (US EPA 2020a). La gestión sostenible de materiales evalúa, entre otros criterios, las sustancias peligrosas presentes en los materiales y los productos a lo largo de todo su ciclo de vida, exige la divulgación de todos los materiales y aumenta el intercambio de conocimientos a lo largo de la cadena de suministro (que incluye a los recicladores). Ello ayuda a minimizar las liberaciones de sustancias químicas producidas por las existencias de materiales y productos y a generar materias primas secundarias seguras y sostenibles en el contexto de una economía circular. El embalaje es un ejemplo de cómo la innovación en química verde y sostenible tiene un importante potencial para desarrollar materiales no tóxicos y más sostenibles (Sustainable Packaging Coalition 2020).

### Enfoque de diseño y diseño de productos sostenibles

El enfoque de diseño es un enfoque para la solución de problemas complejos, entre otros, los problemas

de sostenibilidad (Buhl et al. 2019). A diferencia de los enfoques convencionales que parten de la solubilidad técnica, y la asumen, el enfoque de diseño coloca las necesidades del cliente (así como las invenciones centradas en el usuario) en el centro del proceso, lo que exige una comunicación constante innovador-cliente. El enfoque de diseño es también un medio que permite aumentar las competencias del usuario, o de las empresas que lo aplican, para la solución de problemas relacionados con toda clase de innovaciones en productos y servicios. Por ello, el método se utiliza en el examen de los procesos internos de las empresas en ámbitos como las finanzas y la contabilidad, la gestión de la cadena de suministro, la administración de personal y la gestión de clientes (Waerder, Stinnes and Erdenberger 2017). Para una evaluación del porqué y el cómo el enfoque de diseño puede fomentar el desarrollo de la innovación orientada a la sostenibilidad, véase Buhl et al. (2019).

La inclusión en el proceso de diseño de consideraciones relativas a las sustancias no tóxicas de los productos puede ser un factor impulsor de la innovación en la química verde y sostenible. Por ejemplo, la Comisión Europea ha propuesto una iniciativa, en septiembre de 2020, para que se revise la actual Directiva sobre diseño ecológico y se formulen sugerencias sobre medidas legislativas adicionales con miras a que los productos que se comercializan en la UE sean más sostenibles. La iniciativa aborda, entre otras cosas, las sustancias químicas nocivas en sectores como la electrónica y las tecnologías de la información, textiles, mobiliario, acero y cemento (CE s.f.).

## Gestión y adquisición sostenibles en la cadena de suministro

La gestión sostenible en la cadena de suministro ayuda a garantizar que las decisiones sobre compras y adquisiciones satisfagan los criterios de sostenibilidad, de manera que se cree una fuerza que impulse a los proveedores en las fases iniciales de la cadena de producción a participar en los mercados cada vez mayores de productos sostenibles. El concepto incluye el diseño y el desarrollo del producto, la selección de los materiales (incluida la extracción de materias primas o la producción agrícola), la fabricación, el embalaje, el transporte, el almacenamiento, la distribución, el consumo, la devolución y la eliminación (Sarkis 2019).

La adopción de prácticas de gestión sostenible en la cadena de suministro (y resilientes) puede ayudar a las organizaciones y empresas, por medio de las decisiones sobre las compras, a reducir sus repercusiones en el medio ambiente y la salud humana. También ayuda a optimizar las operaciones de extremo a extremo, produce ahorros de costes y, al mismo tiempo, aumenta la rentabilidad y la sostenibilidad. “Juntos por la sostenibilidad” es un ejemplo de programas de gestión sostenible en la cadena de suministro en el sector de la química. Se trata de una iniciativa conjunta de 26 empresas químicas que utilizan una sola norma de auditoría y evaluación, lo que crea una fuerza que impulsa en todas las empresas la innovación para solucionar los problemas de sostenibilidad identificados (Together for Sustainability 2020)..

## 5.4 Programas de intercambio de conocimientos y de premiación

En los ámbitos público y privado, el intercambio de conocimientos es un instrumento esencial para garantizar que los conocimientos se compartan ampliamente y de forma organizada. Por lo tanto, la ampliación de las plataformas de gestión del conocimiento a diferentes niveles tiene potencial para apoyar a los interesados de

los sectores público y privado en sus actividades de promoción de la innovación en química verde y sostenible. Los intercambios de información entre los Gobiernos podrían ayudar a establecer cooperación y solucionar problemas y conducir al logro de enfoques y prácticas armonizadas. Por ejemplo, podrían incluir conocimientos sobre





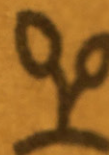
PLASTIC FREE



COMPOSTABLE



RECYCLED



BIO

DEGRADABLE



productos químicos, soluciones innovadoras, productos y alternativas sostenibles. Además, podrían fomentar el intercambio sobre las mejores prácticas y políticas y sobre las condiciones propicias y sus efectos. Desde una perspectiva internacional, los países de ingresos bajos y medios podrían beneficiarse de una corriente de información más fluida y organizada, adaptada a la satisfacción de sus necesidades de conocimientos sobre química verde y sostenible.

Los programas de premiación pueden conferir reconocimientos creíbles a las innovaciones en química verde y sostenible, cuando se basen en el dictamen de expertos que se emita durante el proceso de selección. Por ejemplo, durante más de 20 años los premios Green Chemistry Challenge de la Agencia de Protección Ambiental (Estados

Unidos) han promovido innovaciones en química verde. Los premios confieren un reconocimiento a las tecnologías que incorporan los principios de la química verde en el diseño, la fabricación y el uso de productos químicos (US EPA 2020b). Elsevier Foundation Green and Sustainable Chemistry Challenge, nació en 2015 como un desafío temático con el interés centrado en las innovaciones químicas que tienen efectos positivos en el desarrollo sostenible (Elsevier 2020b). El ISC3 Innovation Challenge nació en 2018 y premia a las empresas emergentes pioneras en esferas temáticas que cambian anualmente (ISC3 2020b). Por último, la publicación de prometedoras iniciativas de investigación en la química verde y sostenible en revistas de acceso abierto puede fomentar el reconocimiento. .

## 5.5 Apoyo a los enfoques y los principios normativos

---

### Criterio de precaución

El criterio de precaución orienta la toma de decisiones, cuando los conocimientos sobre los posibles efectos no alcanzan el nivel de certidumbre necesario y las consecuencias negativas pueden ser importantes. La Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, de 1992, contiene una definición muy conocida de "criterio de precaución". En ella se afirma que: "Cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente". Se dan ejemplos de cómo se ha utilizado el criterio de precaución para fomentar la innovación y la sustitución de productos químicos que suscitan preocupación en Gee et al. (2013). Por lo tanto, este criterio puede convertirse en un importante factor impulsor del fomento de la innovación en la química verde y sostenible.

### Supervisión de los productos

La supervisión de los productos es una estrategia de gestión de productos que asume la responsabilidad de minimizar el efecto del producto a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida, incluida la gestión al término de su vida útil. Es importante para los científicos, ingenieros y toxicólogos y para todos aquellos que diseñan, producen, venden o utilizan un producto. Quiquiera que tenga la capacidad para influir en los impactos ambientales del ciclo de vida del producto tiene una particular responsabilidad. Normalmente es el productor, aunque otros agentes, incluidos los ciudadanos, los consumidores y los responsables de la eliminación, también tienen la responsabilidad de actuar (Northwest Product Stewardship Council s.f.). La determinación de los efectos en el medio ambiente y la salud humana de los productos químicos durante todas las etapas de la cadena de valor (por ejemplo, la eliminación inadecuada de los productos electrónicos que contengan productos químicos tóxicos) crea una oportunidad para que las empresas químicas y las empresas proveedoras

de materias primas trabajen juntas en el fomento del diseño de productos sostenibles que tengan en cuenta consideraciones relativas a la química verde y sostenible.

### Responsabilidad ampliada del productor

La responsabilidad ampliada del productor es una política, de carácter voluntario o con mandato jurídico, que obliga a los productores a asumir responsabilidad por un producto durante las etapas posteriores de la cadena de valor, incluida la eliminación. Las responsabilidades pueden ser financieras o físicas. Esto crea incentivos y modelos empresariales innovadores que evitan los desechos en la fuente y promueven el diseño de productos sostenibles y no tóxicos para una economía circular. Que la responsabilidad ampliada del productor sea voluntaria depende de los enfoques reglamentarios específicos de cada país.

La responsabilidad ampliada del productor es especialmente pertinente para el desarrollo de nuevos productos y grupos de productos, como los aparatos eléctricos y electrónicos (OECD n.d.) o los materiales de embalaje. Por ejemplo, Coop Denmark encargó proactivamente una investigación sobre innovación a un proveedor con miras a sustituir determinados productos químicos fluorados presentes en productos para el embalaje de alimentos con una alternativa sostenible (no química) (Green Science Policy Institute 2013), atendiendo a las preocupaciones de seguridad expresadas por los consumidores. Además de reducir al mínimo los productos químicos que suscitan preocupación, en el desarrollo de los productos, y prevenir los desechos en la fuente, la responsabilidad ampliada del productor incentiva el tratamiento y el reciclaje adecuados de los productos químicos peligrosos, cuando los productos lleguen al término de su vida útil.

### Responsabilidad ampliada del consumidor

El concepto de “responsabilidad ampliada del consumidor” complementa el concepto de responsabilidad ampliada del productor, pero no debería sustituirlo. Estimula las opciones sostenibles de mercado que se ofrecen a los consumidores,

por ejemplo, mediante programas de permuta para la modernización (TIFU), en los mercados de productos electrónicos de consumo (Sheu and Choi 2019). Los modelos de negocios tipo TIFU están dirigidos a los consumidores para la modernización de sus aparatos viejos, la configuración de modalidades de consumo más sostenibles y la reducción de la generación de desechos. A medida que se ofrezcan a los consumidores estas oportunidades, y las aprovechen, los agentes del sector privado podrían sentirse motivados a diseñar más productos sostenibles y más modelos empresariales circulares.

### Responsabilidad social empresarial

La responsabilidad social empresarial es un concepto utilizado por las empresas para integrar consideraciones sociales y ambientales en las operaciones comerciales y comunicarse con sus interesados y con las comunidades en las que funcionan. Su objetivo es ayudar a las empresas a lograr un equilibrio entre los imperativos económicos, ambientales y sociales (“enfoque de triple balance”) (United Nations Industrial Development Organization [UNIDO] 2020). Las políticas sobre la responsabilidad social empresarial podrían utilizarse para dar mayor impulso al modelo de compañía comercial que favorece una mayor sostenibilidad, incluso mediante disposiciones específicas destinadas a promover los objetivos de la química verde y sostenible en toda la empresa.

### Consideración de la equidad de género y los grupos vulnerables

Las mujeres, los niños, los grupos de bajos ingresos y las personas de color se encuentran entre los grupos vulnerables que están desproporcionadamente expuestos a los productos químicos peligrosos (Temper et al. 2018; UNEP, 2019b; Woo et al. 2019; Johnston and Cushing 2020). Ello exige la adopción de medidas de intervención e innovación específicas para proteger la salud de estos grupos vulnerables contra los productos químicos tóxicos. La aplicación de los objetivos de la química verde y sostenible a la hora de determinar las medidas pertinentes puede ser un elemento importante para el logro de una protección adecuada y garantizar “la equidad

de trato para la mujer y el hombre en función de sus necesidades respectivas” (International Labour Office 2000).

### Derechos humanos y el estado de derecho

Los instrumentos internacionales de derechos humanos imponen a los países y a las empresas la obligación de respetar los derechos humanos, entre otros, los que se ven amenazados por los productos químicos y los desechos peligrosos. El

uso de enfoques basados en los derechos humanos complementa y respalda las medidas legislativas y reglamentarias que garantizan la protección de un recurso efectivo y el acceso a este. Algunas empresas de la industria química, como BASF y Merck, han suscrito los Principios Rectores sobre las Empresas y los Derechos Humanos de las Naciones Unidas.

Para un examen detallado de este tema, sírvase consultar el capítulo 8 de la Parte IV de Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial II.

## 5.6 Integración de la química verde y sostenible en la gobernanza empresarial

La Meta 12.6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible alienta a las empresas, en especial las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes (Government of the US n.d.) Se ha desarrollado un marco de indicadores para medir los progresos (United Nations Conference on Trade and Development 2019). Conforme al Objetivo de Desarrollo Sostenible 12.6, un número cada vez mayor de minoristas, fabricantes de productos y empresas químicas han integrado objetivos y medidas de sostenibilidad, como la gestión sostenible de la cadena de suministro o la responsabilidad ampliada del productor, en sus marcos de gobernanza empresarial.

Las medidas de sostenibilidad empresarial de especial importancia para el fomento de la innovación en química verde y sostenible incluyen: la ampliación del establecimiento de normas de

carácter voluntario para los productos químicos que causan emisiones que suscitan preocupación más allá del cumplimiento, la armonización de los protocolos relativos a la gestión de productos químicos en todos los sectores de la industria (por ejemplo, sobre la divulgación total de los materiales y el etiquetado de los productos), el uso de herramientas de evaluación del ciclo de vida y de criterios de medición, la presentación de informes para abordar la toxicidad y la sostenibilidad de los productos a lo largo de su ciclo de vida y la exigencia sistemática de que se diseñen productos y procesos de producción más seguros y más sostenibles. Las entidades gubernamentales, por ejemplo, las que se ocupan de la innovación, la competitividad y el comercio en la esfera de la industria, podrían dar notoriedad a estas iniciativas mediante programas y estructuras ya existentes, así como a través de las políticas y los programas sectoriales de facilitación que se presentan en el capítulo 6.



# 6



# SECTORES Y PROGRAMAS DE FACILITACIÓN PARA PROMOVER LA QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBLE >

6.1	Función de los sectores y programas de facilitación en la promoción de la química verde y sostenible	72
6.2	Educación sobre química verde y sostenible	72
6.3	Investigación e innovación en química verde y sostenible	73
6.4	Incentivos financieros y modelos empresariales	78

## 6.1 Función de los sectores y programas de facilitación en la promoción de la química verde y sostenible

---

Si bien en el capítulo 5 se presentaron las herramientas, los instrumentos y las oportunidades para la adopción de las políticas aplicables para el fomento de la química verde y sostenible, en el capítulo 6 se examinan sectores, programas y enfoques más propicios estratégicamente. Se aborda, en primer lugar, la educación sobre química verde y sostenible, la investigación y la innovación, así como los modelos empresariales y la financiación. Muchas de estas esferas habitualmente no han tratado de manera directa la agenda para la química verde y sostenible. Por lo tanto, el reto consiste en identificar las vinculaciones importantes e iniciar acciones que garanticen que los sectores y los programas pertinentes puedan desempeñar una función propicia para el fomento de la química verde y sostenible.

## 6.2 Educación sobre química verde y sostenible

---

La ampliación de las investigaciones, la innovación y el desarrollo de productos sostenibles en la esfera de la química requiere una nueva generación de químicos e ingenieros capacitados para llevarla a cabo. Los medios de educación formal, informal y no formal, así como la educación de una gama más amplia de interesados y del público en general, pueden ayudar a conseguirlo. El PNUMA publicará un manual especializado sobre este tema a lo largo de 2021.

Las oportunidades para la reforma relacionada con la química verde y sostenible comprenden, más que nada, la integración de la toxicología, la química verde y sostenible, y los temas pertinentes de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en los planes de estudio de la enseñanza primaria, secundaria y terciaria y en las escuelas profesionales. El Ministerio de Educación de India, por ejemplo, está ensayando un programa en el que todos los químicos asisten a un curso de un año sobre

química verde (UNEP 2019b). La Iniciativa Mundial Química Verde de la ONUDI y el Centro de Química Verde e Ingeniería Verde de la Universidad de Yale tienen un programa educativo para aumentar el conocimiento en todo el mundo sobre la química verde y las capacidades en esa materia, el programa pone a disposición del público materiales gratuitos. Se han realizado actividades experimentales en Brasil, Colombia, Egipto, Serbia, Sudáfrica y Sri Lanka (Yale University, n.d.). Algunos ejemplos de cursos de desarrollo profesional sobre química verde y sostenible son un curso en línea impartido por la Universidade Federal de São Carlos (Brasil) y un curso de verano ofrecido por la Universidad de Leuphana (Alemania). Estas actividades pueden servir de inspiración a otros países y organizaciones para que aumenten sus esfuerzos.

Como resultado de estas y otras actividades, se dispone de herramientas y materiales educativos sobre química verde y sostenible para los niveles

### Recuadro 6.1: Química verde y sostenibilidad en el curso de capacitación y formación profesional: un estudio de caso de Brasil (UNEP 2019b)

El Servicio Nacional de Capacitación Industrial, organizado y dirigido por empresarios del sector de la industria por conducto de la Confederación Nacional de la Industria y las federaciones estatales, fue creado para formar trabajadores cualificados para la industria brasileña. En colaboración con el Ministerio de Relaciones Exteriores, funciona en Cabo Verde, Guinea-Bissau, Guatemala, Paraguay, Timor Oriental, Mozambique, Perú, Jamaica y Santo Tomé y Príncipe. En 2015, se puso en marcha en Brasil el Instituto de Química Verde SENAI. Está comprometido con el aumento de la concienciación a nivel general en todo el mundo y de las capacidades en relación con los enfoques de la química verde que pueden implantarse con el objetivo de diseñar productos y procesos que traigan beneficios ambientales a todos los países a lo largo de sus ciclos de vida. En el marco de la Iniciativa de Química Verde de la ONUDI, un proyecto piloto demostrará que la química verde funciona para usarla en aplicaciones en gran escala en el ámbito de la producción de plásticos de base biológica en Brasil. Otros estudios se centrarán en el fomento de las aplicaciones de la química verde y la tecnología de la ingeniería verde en los países en desarrollo y los países con economías en transición (Yale University, n.d.).

primario, secundario, terciario y profesional. Sin embargo, se requieren otras medidas para difundir las mejores prácticas y superar las barreras en el mundo académico y el sector privado que impidan adoptar la química verde y sostenible. Las redes nacionales, regionales y mundiales en funcionamiento pueden utilizarse para difundir las mejores prácticas e intercambiar las enseñanzas extraídas. La química verde y sostenible también

debería integrarse en actividades más amplias con el objetivo de incluir la sostenibilidad en la educación, como es el caso de la iniciativa de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura sobre educación sostenible.

Para un examen detallado de este tema, sírvase consultar el capítulo 2 de la Parte IV de Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial II.

## 6.3 Investigación e innovación en química verde y sostenible

### 6.3.1 El ecosistema de la innovación química y sus agentes clave

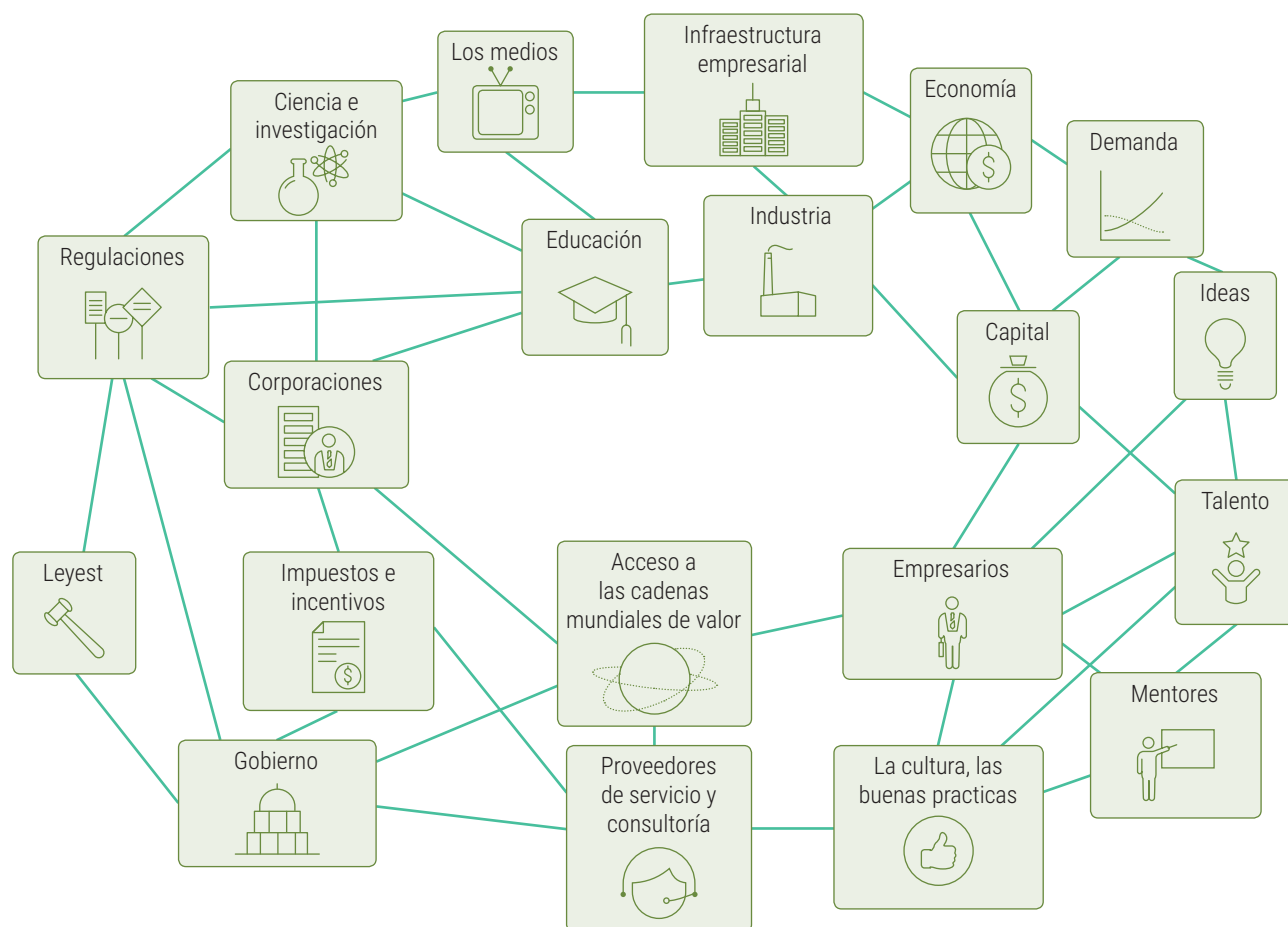
La aceleración de las investigaciones y la innovación mediante las medidas de colaboración y de facilitación, incluso a través de las empresas emergentes, es clave para cumplir la promesa de que la química verde y sostenible contribuirá al cumplimiento de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Las investigaciones y la innovación pertinentes en el ámbito de la química tienen lugar en un ecosistema de innovación más amplio que incluye diversos agentes y complejas relaciones (Jackson 2011), como se presenta en la figura

6.1. Los institutos nacionales de investigación y tecnología, las agencias de desarrollo económico y los programas de promoción del comercio pueden apoyar las actividades de colaboración nacionales e internacionales pertinentes.

#### Universidades

Tradicionalmente, las universidades se han centrado en la enseñanza y la investigación básica, pero en vista de la presión para que se realicen investigaciones aplicadas o con fines específicos, se dedican cada vez más a actividades empresariales y comerciales (Etzkowitz, et al. 2008). Esto significa que se convierten no solo en solucionadores de

Figura 6.1: **Modelo del ecosistema de innovación** (adaptado de Ryzhonkov 2013)



problemas, inventores y empresarios (EC and OECD 2012), sino también en importantes interesados en el panorama de la innovación en química verde y sostenible. Entre los ejemplos de actividades universitarias importantes cabe citar la concesión de patentes o licencias por razones de innovación y el establecimiento de sistemas de apoyo a las empresas emergentes, incluida la formación de empresas derivadas (Klofsten and Jones-Evans 2000). La formación de jóvenes investigadores es fundamental para garantizar la viabilidad de las empresas emergentes a largo plazo. Para superar las limitaciones de los planes de estudio y generar condiciones que favorezcan el desarrollo de nuevas empresas, la creación de vínculos entre los grupos de investigación, los planes de estudio y la industria son elementos clave para el fomento del desarrollo de empresas orientadas a la química verde y sostenible (Ocampo-López et al. 2019).

### Empresas emergentes

Las iniciativas de las empresas emergentes y los jóvenes empresarios se están convirtiendo en elementos importantes para cosechar la totalidad de los beneficios que se derivan de la química verde y sostenible. Las empresas emergentes contribuyen significativamente a la innovación y a la creación de empleo y riqueza (WEF 2018). Invierten importantes recursos en investigación y desarrollo y fomentan la transferencia de tecnología entre regiones y cadenas de valor mediante la cooperación internacional (Oviatt and McDougall 2005). Sin embargo, en las economías en desarrollo y las economías emergentes, estas empresas encaran determinados problemas, como la falta de infraestructura básica de laboratorio y de acceso a capital (UNEP 2017b).



Para aprovechar al máximo su potencial, es importante apoyar a las empresas emergentes con diversas medidas, que van desde oficinas de innovación tecnológica con sede en universidades, pasando por la creación de entornos propicios para estas empresas de acuerdo a programas de incubación y aceleración, hasta la integración de consideraciones sobre química sostenible en los bonos verdes, incluidos los que comprenden la mitigación del cambio climático. Estas iniciativas podrían contribuir a garantizar que las investigaciones de las empresas emergentes en el sector químico cumplan los objetivos de la química verde y sostenible, alentándolas a que tengan en cuenta las consideraciones orientativas sobre la química verde y sostenible y a que utilicen estas consideraciones en su proceso de selección.

### Pequeñas y medianas empresas (PYME)

Las pequeñas y medianas empresas (PYME) desempeñan una función fundamental en la mayoría de las economías, especialmente en los países en desarrollo. Las PYME representan la mayoría de las empresas del mundo y contribuyen de manera importante a la creación de empleo y al desarrollo económico mundial. Representan alrededor del 90 % de las empresas y más del 50 % del empleo en todo el mundo (World Bank Group 2020). Las PYME son especialmente receptivas a las innovaciones ecológicas debido a su adaptabilidad y flexibilidad y tienen potencial para ser un factor impulsor clave de una economía con uso eficiente de los recursos (Bisgaard and Tuck 2014). Dado que muchas PYME encaran limitaciones de recursos, en particular para la investigación y la innovación, las medidas de apoyo, como las sugeridas para las empresas emergentes son importantes para promover su participación en la innovación verde y sostenible en el ámbito de la química. Además, se podrían establecer programas de apoyo práctico para fomentar el uso de productos químicos más seguros. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (US OSHA), por ejemplo, creó un sitio web y un programa de desarrollo de capacidades “Transición a productos químicos más seguros” para apoyar a las PYME en la toma de decisiones fundamentadas en alternativas químicas (US OSHA n.d.).

### La industria química

Las empresas químicas realizan importantes actividades de investigación y desarrollo intensivas en capital e ingeniería (Whitesides 2015). En vista de los altos costes de las investigaciones y la innovación, se está desarrollando una estrecha colaboración entre la industria y el mundo académico. En los últimos años, importantes innovaciones químicas, como la catálisis heterogénea, la síntesis de monómeros, la química farmacéutica de molécula pequeña, la química organometálica, la electroquímica y el almacenamiento de energía (Whitesides 2015) han sido inventadas o desarrolladas conjuntamente. El apoyo directo del sector privado a las universidades también es valioso. Puede incluir, por ejemplo, financiación para investigaciones, asociaciones con fines de capacitación y contratos de servicios técnicos (Malairaja and Zawdie 2008).

### La industria de servicios financieros

Los agentes de los sectores financieros con potencial para determinar la sostenibilidad en la innovación química incluyen tanto entidades de las finanzas públicas como de las privadas. Las primeras comprenden a los bancos nacionales, regionales o multilaterales de desarrollo, a los organismos de crédito a la exportación o empresas públicas y servicios públicos. Entre las entidades y fuentes de financiación privadas se cuentan, por ejemplo, las cajas de pensiones, los fondos soberanos, los fondos mutuos, las compañías de seguros, los fondos de cobertura, los bancos y los gastos de capital de las empresas. El sector de los seguros, como gran inversor, también puede ayudar a garantizar que sus inversiones contribuyan a la innovación en la química verde y sostenible. En el sector bancario, las decisiones sobre los préstamos pueden dirigir las inversiones hacia proyectos y tecnologías sostenibles. Los inversores institucionales pueden influir para que las empresas adopten prácticas más sostenibles y, como accionistas, exigirles que actúen de modo sostenible (UNEP 2019b).

## Gobierno

Los Gobiernos desempeñan una importante función facilitadora del fomento de la innovación en la química, ayudando a corregir los fallos del mercado en cuanto a la generación de innovaciones (United Nations Economic Commission for Europe [UNECE] 2012). Pueden ofrecer, por ejemplo, incentivos financieros, financiar infraestructuras o financiar directamente proyectos de innovación (Lopes da Silva, Baptista Narcizo and Cardoso 2012). Pueden también garantizar la remoción de las barreras que dificulten la innovación (UNIDO 2017). Los Gobiernos también desempeñan un papel fundamental en la reunión de sectores e interesados clave para promover el interés público.

Las estrategias de facilitación que los Gobiernos podrían dirigir son, entre otras, el desarrollo de políticas industriales nacionales o de programas que fomenten la innovación en la química verde y sostenible. Estas iniciativas están en consonancia con las funciones de los Gobiernos en cuanto a la creación de instrumentos de facilitación y de condiciones favorables, en lugar de tomar decisiones específicas (UNECE 2012). El Gobierno de Ontario (Canadá), por ejemplo, ha invertido más de 16 millones de dólares para ayudar a crear el GreenCentre, que apoya las actividades de investigación y desarrollo precomerciales en química verde para favorecer el desarrollo de comunidades sostenibles, prósperas y saludables, empleos de alta calidad y una vida mejor para todos los ciudadanos de Ontario (GreenCentre Canadá 2020).

## Otros agentes importantes

Las ONG, las asociaciones de trabajadores y empresarios, así como el público en general, no suelen llevar a cabo investigaciones sobre química, aunque desempeñan un papel importante en el proceso de innovación. Por ejemplo, pueden organizarse diálogos que se centren en la innovación con los interesados a fin de elaborar marcos regulatorios favorables a la innovación. Este enfoque requiere nuevos canales de interacción, pero tiene un importante potencial para fomentar la innovación en química verde y sostenible con miras a implementar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (WEF 2018). Las ONG y las asociaciones

de trabajadores tienen una función especialmente importante, ya que pueden ayudar a que las empresas rindan cuentas de sus actos. El uso de campañas basadas en el mercado combinado con la adopción de medidas reglamentarias puede ser un importante factor impulsor de la promoción de la innovación en química verde y sostenible.

## 6.3.2 Otras medidas y consideraciones favorables

---

### Vinculación entre la investigación y las necesidades de desarrollo

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible sirve de marco útil para la orientación de las futuras investigaciones sobre química verde y sostenible y la configuración de los programas de investigación de agentes públicos y privados, cabe señalar que lo ideal sería que se desarrollasen conjuntamente. SusChem, por ejemplo, es un foro que reúne a la industria, el mundo académico, los encargados de formular políticas y la sociedad en general para establecer prioridades en relación con las investigaciones directamente vinculadas con la Agenda 2030 (SusChem 2019). Para fomentar innovaciones relativas a la sostenibilidad, los agentes involucrados en la innovación química pueden evaluar los objetivos orientativos y las consideraciones sobre química verde y sostenible que se presentan en el capítulo 3. Por ejemplo, las incubadoras y los aceleradores para empresas emergentes y los mecanismos de financiación podrían integrarse en los objetivos de la química verde y sostenible en el proceso de selección, especialmente si la investigación está financiada conjuntamente con entidades públicas.

### Fortalecimiento de la colaboración para la innovación

Los mecanismos de colaboración para la innovación han demostrado su eficacia para diseñar las investigaciones y la innovación de manera que en ellas se involucren una gama de interesados y de consideraciones sobre sostenibilidad y se satisfagan las necesidades de estos. En las empresas

Figura 6.2: Nuevos enfoques de colaboración en la industria química (adaptado de WEF 2018)



químicas, se están creando nuevas e innovadoras formas de colaboración, así como entre estas y entidades externas, como clientes y consumidores, reguladores y organizaciones de la sociedad civil. Un ejemplo del que se han extraído valiosas enseñanzas es el problema de la innovación en colaboración del Consejo de Química Verde y Comercio sobre conservantes seguros y eficaces para los productos de consumo (Becker and Tickner 2020).

Las asociaciones de colaboración se rigen a menudo por los Objetivos de Desarrollo Sostenible y se establecen pensando en mercados intersectoriales, diversos y globales (WEF 2018). En el sector textil, por ejemplo, la innovación en colaboración puede incluir a la industria química, las empresas químicas emergentes, los diseñadores, los posibles usuarios finales, los institutos de investigación y los posibles inversores. Los Gobiernos y otros interesados pueden facilitar ese tipo de colaboración y alentar la creación de consorcios mediante el establecimiento de políticas sobre innovación, los planes de subsidios o los programas tecnológicos pertinentes.

Para un examen detallado de este tema, sírvase consultar el capítulo 4 de la Parte IV de Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial II.

### Fortalecimiento de los organismos directivos de la política científica

Se han creado algunos organismos y mecanismos nacionales e internacionales que reúnen a científicos y encargados de formular políticas para garantizar que la formulación de las políticas se fundamente en las pruebas científicas más recientes. Estos organismos pueden funcionar como importantes propulsores de la innovación en química verde y sostenible. A nivel internacional, el Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (PORC) del Convenio de Estocolmo analiza las propuestas de las Partes para la inscripción de nuevos productos químicos, evalúa las posibles medidas de control, teniendo en cuenta consideraciones socioeconómicas y formula recomendaciones sobre la inclusión de nombres en las Listas. Otro ejemplo es el Comité de Examen de Productos Químicos del Convenio de Rotterdam que, entre otras funciones, examina las propuestas para la inclusión de formulaciones plaguicidas extremadamente peligrosas.

## 6.4 Incentivos financieros y modelos empresariales

---

### Instrumentos de mercado

El uso de instrumentos de mercado tiene potencial para complementar eficazmente los enfoques reglamentarios para la promoción de la innovación en la química verde y sostenible. Las posibles medidas comprenden, entre otras, el uso de un impuesto diferencial sobre los productos químicos peligrosos, atendiendo a las lecciones aprendidas con la reciente tributación basada en los peligros y en los riesgos o el uso de tasas para acelerar la eliminación de sustancias que son motivo de mucha preocupación.

Los programas de financiación son igualmente importantes. Los bonos verdes, por ejemplo, son un “título de deuda que se emite para recaudar fondos específicamente para apoyar proyectos ambientales o relacionados con el clima” (International Bank for Reconstruction and Development and World Bank 2017). Los bonos verdes diseñados para fomentar la sostenibilidad conllevan incentivos fiscales, como la exención fiscal y la deducción fiscal, que los hacen más atractivos que un bono imponible comparable. Aunque los bonos verdes están orientados prioritariamente hacia el cambio climático (Ernst & Young 2016), también podría explorarse su potencial para fomentar las inversiones y la innovación en química sostenible.

### Modelos empresariales sostenibles

Los modelos empresariales que concentran sus esfuerzos en la sostenibilidad y la circularidad requieren que las empresas reconsideren sus productos y procesos. Ello brinda la oportunidad de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, disminuir el uso de productos químicos que suscitan preocupación y reducir el impacto de sus productos y procesos, incluso al término de su vida útil (por ejemplo, reduciendo los desechos). Abrir

un proceso de diseño de producto e involucrar a los interesados de toda la cadena de valor puede ayudar a resolver cuestiones relacionadas con la sostenibilidad desde el principio.

La eco-innovación, basada en el enfoque de ciclo de vida, ayudará a las empresas, en particular a las PYME, a adoptar modelos empresariales sostenibles. Como resultado, pueden acceder a mercados nuevos y en expansión, aumentar la rentabilidad en toda la cadena de valor y adelantarse a los reglamentos y las normas, mejorando, al mismo tiempo, la eficiencia en el uso de los recursos, incluido el uso de productos químicos que suscitan preocupación (Bisgaard and Tuck 2014). Ello puede traducirse en productos innovadores y sostenibles y la mejora de los procesos, en sistemas de regeneración de desechos y modelos basados en los servicios, como el arrendamiento químico.

En el marco del Plan de Arrendamiento Químico orientado a los servicios, los proveedores venden servicios (por ejemplo, número de coches pintados) en lugar de productos químicos, lo que crea incentivos para minimizar el uso de productos químicos y maximizar la eficiencia en el uso de los recursos (UNIDO 2017). Un ejemplo exitoso se puso en práctica en Colombia, donde la introducción de un plan de arrendamiento químico en la industria petrolera en el campo de la depuración de agua se tradujo en la reducción del 20 % en el consumo de productos químicos, disminuyendo, al mismo tiempo, los costes de depuración de agua en 80 %. A nivel internacional, la Declaración de Intención sobre Arrendamiento Químico de 2016 ha sido firmada por Austria, Alemania y Suiza, El Salvador, Sri Lanka y Serbia.

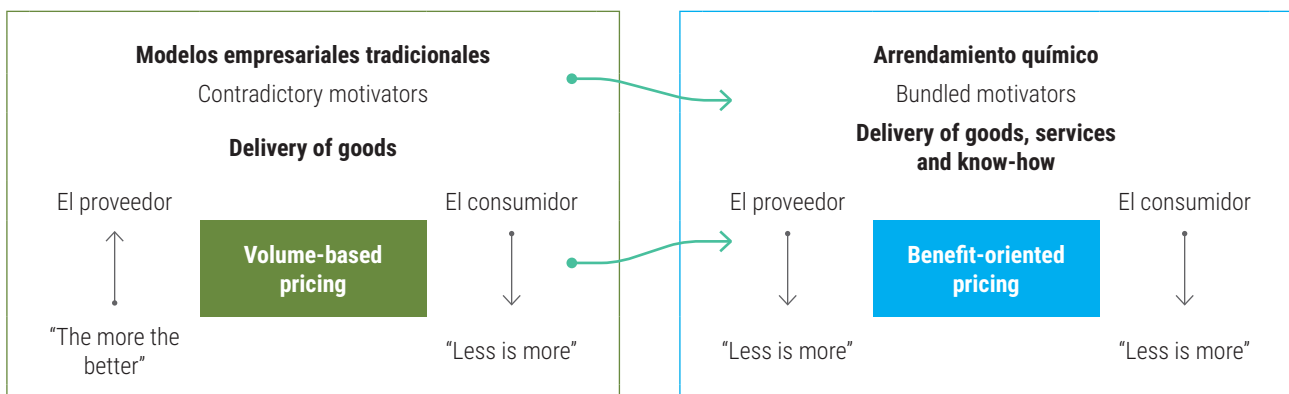
Para un examen detallado de este tema, sírvase consultar los capítulos 5 y 6 de la Parte IV de Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial II.



**Cuadro 6.1: Tipos de instrumentos de mercado y ejemplos de su aplicación a la gestión de productos químicos** (basado en Stavins 2001; Sterner and Coria 2011; OECD n.d.)

Instrumento de política	Descripción	Ejemplo de aplicación
Impuesto	Al aumentar el precio del uso de un producto químico, un impuesto incentiva la reducción de su uso. Normalmente es recaudado por el Estado, y el producto de la recaudación se destina al presupuesto general. El nivel impositivo debería reflejar los daños causados por la producción, el uso o la eliminación del producto químico que, de no existir el impuesto, no se reflejarían en el precio de mercado.	Plaguicidas fertilizantes inorgánicos; disolventes clorados; baterías
Cargo/tasa	Similar a un impuesto, pero los ingresos son normalmente asignados a fines específicos. El nivel de una tasa debería reflejar el coste de la prestación de un servicio específico, como es el caso del tratamiento de desechos peligrosos.	Desechos peligrosos; plaguicidas o contenedores de productos químicos; neumáticos; baterías
Subsidio	Un subsidio es el reflejo de un impuesto. Puede ofrecer incentivos para aumentar el uso de productos químicos alternativos que sean menos peligrosos. Concretamente, las autoridades tal vez desearán subsidiar el aprendizaje y el desarrollo tecnológico.	Subsidios para la agricultura orgánica; eliminación del uso del plomo en la pintura
Eliminación de subsidios	En muchos casos, los subsidios se utilizan sin prestar suficiente atención a su distribución, lo que puede dar lugar a prácticas inadecuadas desde el punto de vista de la salud o el medio ambiente. Por lo tanto, la eliminación de los subsidios se considera un instrumento de política en sí misma.	Eliminación de subsidios para el uso de fertilizantes químicos o plaguicidas
Depósito-reembolso	Se paga un recargo cuando se adquieren productos potencialmente contaminantes. Se recibe un reembolso cuando se devuelve el producto a un centro autorizado, ya sea para su reciclaje o para su eliminación.	Plaguicidas o contenedores de productos químicos, baterías, neumáticos,
Permisos negociables	Se establece un nivel general de contaminación "aceptable" que se asigna a las empresas en forma de permisos. Estos permisos pueden negociarse en un mercado a precios de mercado.	Plomo en la gasolina (comercio entre refinerías), sustancias que agotan la capa de ozono (comercio entre productores e importadores)

**Figura 6.3: Modelos empresariales tradicionales vs Arrendamiento químico** (adaptado de Joas, Abraham and Joas 2018, p. 398)



Replicated with permission of Springer Nature: permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc. For a detailed discussion on this topic, please refer to GCO-II, Part IV, Chapters 5 and 6.







# CRITERIOS DE MEDICIÓN Y PRESENTACIÓN DE INFORMES PARA PROMOVER LA QUÍMICA VERDE Y SOSTENIBLE >

7.1	Función de los criterios de medición y de la presentación de informes para promover la química verde y sostenible	82
7.2	Criterios de medición de la química verde y sostenible	82
7.3	Evaluación de la sostenibilidad y presentación de informes	84

## 7.1 Función de los criterios de medición y de la presentación de informes para promover la química verde y sostenible

---

En la literatura sobre gestión se cita con frecuencia la siguiente reflexión de Peter Ducker: “lo que no se puede medir, no se puede mejorar”. La lógica que encarna este concepto es la de que, a menos que se disponga de criterios de medición sólidos, es difícil cuantificar los progresos y hacer los ajustes necesarios para obtener el resultado deseado. En este capítulo se presentan criterios de medición y sistemas de información que apoyan la promoción de la química verde y sostenible. Si bien algunos de ellos están directamente relacionados con la química verde y sostenible, otros comprenden temas de sostenibilidad más amplios. En este último caso, se podría estudiar más a fondo el ajuste de estos criterios y de los sistemas de información para promover la innovación en la química verde y sostenible.

## 7.2 Criterios de medición de la química verde y sostenible

---

### Evaluación de los peligros y selección

Peligro químico se refiere a las propiedades intrínsecas de un producto químico que tienen efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Algunos ejemplos de propiedades peligrosas de los productos químicos son la toxicidad aguda, sus propiedades corrosivas, la capacidad para provocar alergias, los efectos a largo plazo en la reproducción, el desarrollo y otros sistemas del cuerpo humano o su persistencia en el medio ambiente (UNEP 2019). El Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos proporciona un conjunto de criterios que ayudan a la evaluación de los peligros de los productos químicos. Existen muchas herramientas que sirven para que las empresas determinen los peligros de los productos químicos y encuentren productos químicos más seguros y ecológicos. GreenScreen®, por ejemplo, es una herramienta que identifica productos químicos

peligrosos y alternativas más seguras (GreenScreen 2020). Facilitar la comprensión del funcionamiento de estas herramientas y de los criterios que utilizan para la selección y determinación de los productos químicos peligrosos y de alternativas más seguras es importante para garantizar que estas sean realmente fiables. En Gauthier et al. (2014) y Panko et al. (2017) se ofrece una visión general y se examinan las herramientas pertinentes.

Para un examen detallado de este tema, sírvase consultar el capítulo 1 de la Parte III de Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial II.

### Factor-E

El “factor-E” es un criterio de medición que permite calcular la proporción de desechos generados por cada unidad de peso de producto (Sheldon 2017). Un factor-e de 10 significa que se



**Cuadro 7.1: Eficiencia en el uso de los recursos en la industria química: relación entre los productos y los desechos generados Sheldon Process Mass Intensity (PMI)** (Sheldon and Brady 2019)

Segmento de la industria	Toneladas anuales	Factor-e (kg de desechos por kg de producto)
Refinado del petróleo	$10^6$ - $10^8$	< 0.1
Productos químicos a granel	$10^4$ - $10^6$	< 1-5
Productos químicos finos	$10^2$ - $10^4$	5-50
Productos farmacéuticos	$10$ - $10^3$	25->100

© 2019 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

generan 10 kg de desechos por 1 kg de producto. Cuanto menor sea el factor-E, más benigno será un proceso desde el punto de vista ambiental. En las empresas farmacéuticas, el factor-E de un producto farmacéutico suele oscilar entre 25 y 100 aproximadamente. Esto significa que se pueden generar hasta 100 kg de desechos por kilogramo de producto sintetizado, lo que ofrece una gran oportunidad para la innovación en la química verde y sostenible.

### Índice de intensidad de masa en el proceso (PMI)

El índice de intensidad de masa en el proceso es otro criterio de medición que permite evaluar y establecer parámetros para medir el avance hacia una fabricación más sostenible. Se trata de la masa total de materiales necesarios y utilizados para producir una masa determinada de producto. Los materiales que se tienen en cuenta son los reactantes, los reactivos y los disolventes utilizados para la reacción y la purificación, así como los catalizadores. Lo ideal es que todos los materiales se incorporen al producto y no se produzcan

desechos. Para un examen de las ventajas de PMI en relación con otros criterios de medición, como el factor-E y la energía del átomo (véase Jiménez González et al. (2011).

### Criterios de medición de la huella química

El método de la Huella Química es un criterio de medición cuantitativo que los fabricantes, las marcas y los minoristas pueden utilizar para medir los progresos alcanzados en la reducción del uso de productos químicos extremadamente que suscitan preocupación. Se trata básicamente de un criterio de medición basado en los peligros, utilizado en el Proyecto de la Huella Química (CFP), una iniciativa de inversores, minoristas, organismos gubernamentales, organizaciones no gubernamentales (ONG) y organizaciones de atención de la salud que se esfuerzan por lograr vidas sanas, agua y aire limpios y un consumo y una producción sostenibles mediante la gestión eficaz de los productos químicos en los productos y las cadenas de suministro. La participación es de carácter voluntario y los resultados están disponibles al público (Rossi et al. 2017).

## 7.3 Evaluación de la sostenibilidad y presentación de informes

El empleo de criterios de medición para evaluar e informar del desempeño en relación con la sostenibilidad de las empresas y los productores de la industria química y los sectores de las fases posteriores está tomando fuerza. Criterios de medición de la sostenibilidad han sido elaborados por una gama de agentes, entre los cuales figuran instituciones públicas, el sector privado y las ONG. La presentación de informes en el marco de los acuerdos ambientales multilaterales relativos a los productos químicos y los desechos también desempeña determinada función en la evaluación del avance hacia el logro de objetivos que estén en armonía con la química verde y sostenible.

Los criterios de medición y los planes de presentación de informes existentes generalmente incluyen una gama de criterios e indicadores, pero, hasta la fecha, no han integrado de manera sistemática cuestiones específicas de los productos químicos (UNEP 2019b). Y, sin embargo, se están logrando avances. La iniciativa *Chemie3*, por ejemplo, se inició en 2013 como una asociación de colaboración de la Asociación Alemana de Química (VCI) con interlocutores sociales clave con miras a apoyar la sostenibilidad como principio rector de la industria química en Alemania. En el centro de estas

medidas están diversos servicios de información y apoyo concebidos para integrar las 12 Directrices sobre la Sostenibilidad de la Industria Química en sus prácticas empresariales y medir su aplicación (*Chemie3* n.d.). Además, bases de datos existentes como los Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) o la plataforma “Zero Discharge of Hazardous Chemicals Gateway” pueden ser readaptados para identificar objetivos que informa la implementación de química verde y sostenible, así como el seguimiento y evaluación del impacto de iniciativas actuales.

La inclusión de la química verde y sostenible y de indicadores de la gestión de los productos químicos más amplios en los marcos de sostenibilidad y presentación de informes hace posible que se comprendan a nivel general las actividades de las empresas, sus consecuencias y la medición del avance hacia menos impactos ambientales y menos contaminación. A modo de ejemplo, también está creciendo el interés de los inversores en el desempeño de la sostenibilidad empresarial relacionada con los productos químicos. En el Índice Dow Jones de sostenibilidad, por ejemplo, se pide a los proveedores de productos químicos y a las empresas de los sectores de las fases posteriores

### Recuadro 7.1: Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes

RETCs son sistemas potentes para la recogida y diseminación de datos relacionados con la emisión de sustancias peligrosas desde zonas industriales y otras instalaciones, así como fuentes difusivos. Han establecido varios sistemas así en Europa (E-PRTR), el RETC de México y el “Toxic Release Inventory (TRI)” en Los Estados Unidos. Estos sistemas trabajan para infundir confianza entre comunidades e industria mientras permitiendo que propietarios de instalaciones demuestran sus iniciativas de eliminación de contaminantes. Países que han implementado RETCs comunican el efecto positivo que han tenido los registros en la fomentación de participación pública que será un motor esencial de aumentar la consciencia sobre química sostenible y verde. Adicionalmente, la riqueza de datos generado por estos instrumentos podrá ser utilizado para identificar focos de contaminación en cual soluciones basado en química sostenible y verde podría tener un efecto inmediato e importante. También, RETCs pueden servir para ayudar en la evaluación continua del impacto que ha tenido procesos de química sostenible en términos de emisiones peligrosos a comunidades cercanas. El TRI en concreto es un estudio de caso interesante en como se puede evolucionar los RETCs para responder a las necesidades de química sostenible a través de la identificación y evaluación del progreso de las iniciativas relevantes.

### Recuadro 7.2: Norma relativa a la información de productos y procesos químicos más ecológicos NSI/ACS (NSF International n.d.)

La Norma relativa a la Información de Productos Químicos y Procesos Más Ecológicos (NSF/GCI 355), publicada en 2010, estableció los criterios para la comparación de los productos químicos y los procesos. Elaborada por NSI y American Chemical Society Green Chemistry Institute (ACS GCI), proporciona un marco para que los fabricantes de productos químicos preparen un informe completo, normalizado y amplio que brinde información a sus clientes a lo largo de toda la cadena de suministro. El informe se utiliza para evaluar los productos químicos y sus procesos de fabricación conexos en diversas categorías clave, entre ellas: las características químicas (es decir, las propiedades físico-químicas, los efectos en la salud humana y los efectos ecológicos); los procesos químicos (es decir, la eficiencia química y la prevención de la producción de desechos, el agua, la energía, el contenido de carbono de base biológica, los procesos de fabricación y tecnológicos innovadores y la seguridad en los procesos) y la responsabilidad social (es decir, trabajo infantil, trabajo forzoso y obligatorio y cumplimiento de las leyes y reglamentos). Se fundamentó en los principios de la química verde, de la ingeniería ecológica, la norma ISO 14000, la Global Reporting Initiative y muchos otros programas vigentes.

que faciliten información sobre el porcentaje de sus productos que contienen determinadas sustancias peligrosas. Estos tipos de iniciativas requieren el uso de la química verde y sostenible. Se deberían alentar más.

Otra esfera de estudio es la relativa a la manera de implementar marcos de sostenibilidad mundiales, como, por ejemplo, el Marco Estratégico para el Desarrollo Sostenible, en el ámbito de los productos químicos, los materiales y los ciclos de vida de los productos (Broman and Robèrt 2017). La metodología básica de la retroalimentación desde los principios de sostenibilidad usa el enfoque sistémico y un proceso orientado hacia el futuro para evaluar y planificar las medidas dirigidas a cerrar la brecha entre la situación actual y un estado futuro (sostenible) deseado. Los principios de sostenibilidad definen las condiciones básicas que ha de respetar una sociedad sostenible para salvaguardar la salud de los sistemas sociales y ecológicos. Como estos principios se fundamentan en el estudio científico de los sistemas naturales y

sociales, proporcionan criterios útiles que sirven de lenguaje común a nivel de la química, los materiales, los productos, las organizaciones, la cadena de valor y los sistemas mundiales dominantes (The Natural Step 2020a).

También se están llevando a cabo autoevaluaciones y se están presentando informes en las fases posteriores, como en el marco de la iniciativa ZDHC, en la que los índices de cumplimiento se están poniendo a disposición del público. Para ayudar a fomentar la credibilidad, algunas empresas han optado por asociarse con organismos externos, como Cradle-to-Cradle Product Standard y The Chemical Footprint Project. Además, se realizan evaluaciones externas independientes como, por ejemplo, a través de la iniciativa Mind the Store, fundada por una ONG.

Para un examen detallado de este tema, sírvase consultar el capítulo 7 de la Parte IV de Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial II.







**ELABORACIÓN POR LOS  
INTERESADOS DE HOJAS  
DE RUTA SOBRE LA QUÍMICA  
VERDE Y SOSTENIBLE >**

## El concepto de hoja de ruta: poderosa herramienta de planificación

El enfoque de hoja de ruta para apoyar la planificación estratégica y la toma de decisiones se ha usado durante muchos años, entre otras, las aplicaciones de la innovación tecnológica (véase, por ejemplo, Phaal, Farrukh and Probert 2004). La elaboración de una hoja de ruta es una técnica que reúne a agentes e interesados para la formulación de una visión común y la planificación a largo plazo para llevarla a vías de hecho. Además de determinar una visión común, las hojas de ruta ayudan a determinar los recursos disponibles, definir las deficiencias y las medidas y obtener la financiación suficiente para subsanar estas deficiencias. Generalmente se utilizan en el sector privado, pero son igualmente pertinentes para otros grupos de interesados, incluidos los organismos públicos. Las hojas de ruta también son un enfoque estructurado para la identificación, evaluación y promulgación de intervenciones que promuevan soluciones tecnológicas. Las hojas de ruta, han sido, por ejemplo, un poderoso instrumento para propulsar la innovación en la industria de los semiconductores (Voorhees and Hutchison 2015).

## Hojas de ruta en el sector químico y en todas las cadenas de valor

El enfoque de hoja de ruta ha sido aplicado por varios agentes del sector químico y de la cadena de valor para fomentar medidas encaminadas al logro de la gestión racional de los productos químicos y los desechos. Bajo los auspicios del Consejo Empresarial Mundial de Desarrollo Sostenible, por ejemplo, las empresas químicas y las asociaciones industriales han elaborado una hoja de ruta para estudiar la forma en que el sector químico puede contribuir a la consecución de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus metas (WBCSD 2018). La Hoja de ruta sobre los productos químicos de la OMS, aprobada en mayo de 2017 por la Asamblea Mundial de la Salud, determina las medidas en las que el sector de la salud tiene una función directiva o de apoyo importante en el fomento de la gestión racional de los productos químicos y los desechos. La Hoja de ruta de la OMS se complementa con un conjunto de manuales prácticos (WHO 2020).

Figura 8.1: **Chemical Sector Road Map** (WBCSD 2018)



También se han elaborado hojas de ruta con un enfoque de cadena de valor que reúne a distintos agentes que tienen participación en todo el ciclo de vida de los productos químicos y los productos en general. Por ejemplo, la Hoja de ruta de la UE para el avance en Europa de la industria química hacia la bioeconomía (RoadToBio 2020) aplica un enfoque de cadena de valor a una variedad de productos, con el objetivo de aumentar el uso de materias primas de base biológica. El ejemplo de la industria europea del PVC y su compromiso de carácter voluntario con la sostenibilidad VinylPlus (Smith and Jarisch 2019) pone de relieve cómo una hoja de ruta puede fomentar un diálogo estructurado y la adopción de medidas sistemáticas para abordar problemas a través del compromiso que asuman los interesados clave de tener en cuenta cuestiones como cerrar el círculo con una red de reciclaje especializada; optimizar las formulaciones de los aditivos pensando en la circularidad y otras cuestiones. La hoja de ruta "Abordar los plásticos marinos: una hoja de ruta hacia una economía circular" expone una estrategia orientada a la

**Figura 8.2: Hoja de ruta de la OMS sobre los productos químicos: ámbitos de acción e interconexiones** (WHO 2018b, p.3)

### Reducción del riesgo

La reducción del riesgo es el resultado de todas las actividades de la hoja de ruta. Algunas actividades disminuyen directamente el riesgo, y todas las actividades contribuyen a reducirlo a largo plazo.

### Capacidad institucional

La capacidad institucional se desarrolla en torno a una base de pruebas y conocimientos y de un fuerte liderazgo. Abarca los marcos legislativos y el adecuado cumplimiento, políticas sólidas, directrices, laboratorios, institutos de toxicología, sistemas de respuesta de emergencia y una mano de obra formada.



### Conocimientos y pruebas

Se requieren conocimientos y pruebas sobre los productos químicos, las vulnerabilidades en materia de salud, cuáles son las intervenciones que mejor funcionan, las deficiencias, las prioridades actuales y otros aspectos para orientar todas las demás intervenciones.

### Liderazgo y coordinación

Se requieren para garantizar que las medidas previstas en la hoja de ruta formen parte de la agenda política y de políticas, cuenten con financiación suficiente, incluyan la contribución de múltiples sectores y cumplan los objetivos nacionales e internacionales.

acción para la determinación de un conjunto básico de soluciones prioritarias que han de aplicar los interesados de la cadena de valor de los plásticos de conformidad con diferentes horizontes temporales y a diferentes escalas geográficas (Wang, Talaue McManus and Xie 2019).

### Oportunidades para la elaboración de hojas de ruta para la química verde y sostenible por parte de los interesados

En vista de los beneficios potenciales de las hojas de ruta, en Perspectivas de los productos químicos a nivel mundial II se alentó a que se elaborasen hojas de ruta controladas por los países e impulsadas por los interesados sobre temas específicos y creadas por diferentes grupos de interesados para apoyar la implementación de la gestión racional de los productos químicos y los desechos después de 2020 y ayudar a la vigilancia del progreso en todos los niveles, incluso a nivel mundial (UNEP 2019b). Acorde con esta sugerencia, diversos grupos de interesados podrían elaborar hojas de ruta a la química verde y sostenible, como componentes importantes de una acción concertada a nivel nacional y orientada a la obtención de resultados a

nivel mundial con vistas a lograr la gestión racional de los productos químicos y los desechos. Estas hojas de ruta podrían elaborarse a diferentes niveles y por intermedio de diferentes interesados, entre ellos, los gobiernos (nacionales, subnacionales o locales), las empresas químicas y los sectores de las fases posteriores, universidades e institutos de investigación y otros agentes pertinentes. Pueden desarrollarse en torno a un tema como el plan de la gestión de solventes elaborado en la región del UNECE. Lo que todos ellos requieren es liderazgo dentro de las organizaciones correspondientes. Ese liderazgo puede ser asumido desde arriba por el personal directivo superior o desde abajo por interesados y personas comprometidas.

### Determinación de medidas por medio de hojas de ruta sobre la química verde y sostenible

Como punto de partida, los interesados tal vez desearán hacer un balance de su actual desempeño en relación con la sostenibilidad y de las oportunidades, teniendo en cuenta los diez objetivos y las consideraciones orientativas referentes a la química verde y sostenible que

### Recuadro 8.1: Proyecto de hoja de ruta sobre la educación en química verde de ACS

Un ejemplo de proceso de hoja de ruta centrado en la química verde y sostenible es el proyecto de hoja de ruta sobre la educación en química verde de ACS. Este proyecto articula una ambiciosa visión de educación sobre química verde: "una educación que prepare e inspire a los químicos a resolver los grandes problemas de la sostenibilidad". Esta visión está en armonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, cuya implementación depende, en gran medida, de la química (Carroll 2019). Para incorporar a los interesados al desarrollo de la hoja de ruta, ACS envió una encuesta a unos 17.000 educadores.

Las preguntas formuladas en la hoja de ruta son, por ejemplo (Voorhees and Hutchison 2015):

- ▶ ¿Cómo pueden los educadores sustituir los materiales de los cursos actuales por materiales que incluyan lecciones y principios de la química sostenible y verde en la enseñanza de la química?
- ▶ ¿Cómo pueden los químicos y los que no son químicos que toman cursos de química como parte de su educación recibir una formación que les haga pensar en la disciplina de forma holística y sostenible sin añadir trabajo a los educadores, que ya están sometidos a una gran presión?
- ▶ ¿Qué recursos existen ya y qué necesidades hay que satisfacer?

aparecen en el capítulo 3. Este análisis podría ayudar a dar una visión de la química verde y sostenible a la organización y fundamentar la determinación de las posibles medidas. Por ejemplo:

- ▼ Los Gobiernos podrían proporcionar apoyo especial a los programas de investigación ecológica y sostenible de la industria y los círculos de investigadores e impulsar la innovación mediante medidas reglamentarias;
- ▼ Las universidades podrían incluir de manera sistemática la química verde y sostenible en los programas de enseñanza, las actividades de investigación y el apoyo a las empresas emergentes;
- ▼ Las empresas químicas podrían incluir de manera sistemática la evaluación del ciclo de vida, fijar objetivos de innovación para sustituir los productos químicos que suscitan preocupación y garantizar la comunicación dentro de la cadena de suministro; o
- ▼ Las organizaciones de la sociedad civil podrían ayudar a trasladar conocimientos a los consumidores para coadyuvar a crear la demanda de productos químicos y productos verdes y sostenibles en general.

### Elaboración de una hoja de ruta tecnológica: consideraciones metodológicas

Existe una gama de enfoques metodológicos que apoyan la elaboración de hojas de ruta sobre la innovación tecnológica. Tras hacer un examen de los diversos enfoques de hoja de ruta y teniendo en cuenta que tanto el sector energético como el sector

Figura 8.3: Lógica de un proceso de hoja de ruta (IEA 2014, p. 5)

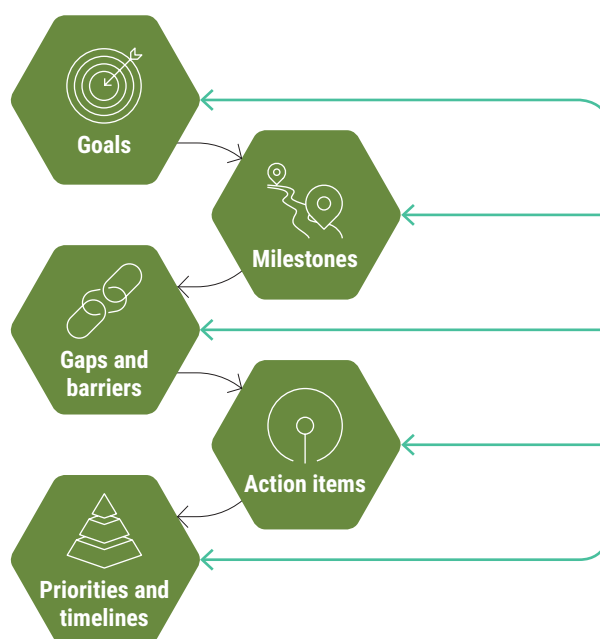
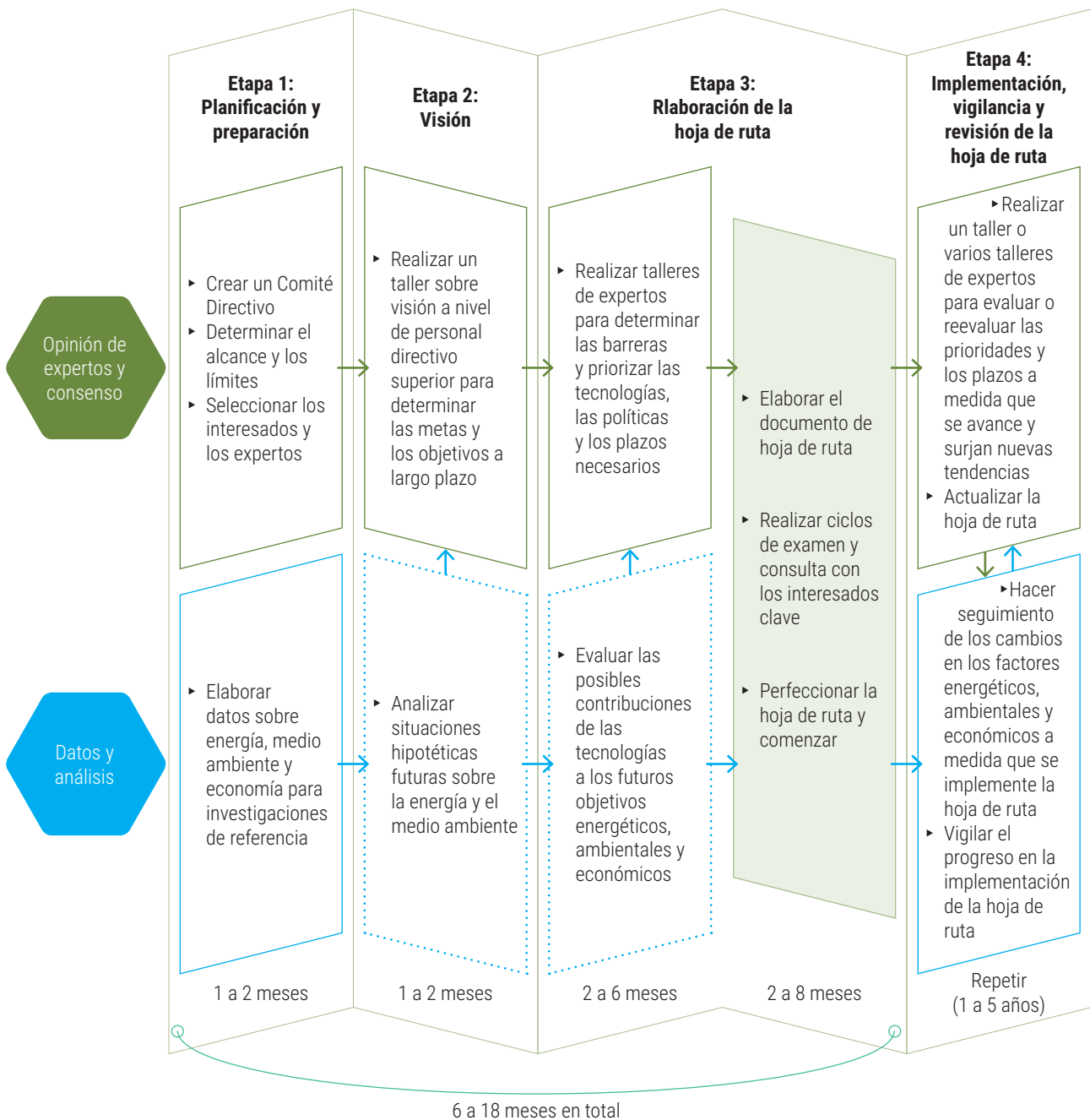




Figura 8.4: Proceso para la elaboración de una hoja de ruta de tecnología energética (IEA 2014, p. 6)



Nota: las líneas de puntos indican los pasos opcionales en función de las capacidades de análisis y los recursos.

químico hacen frente a problemas estratégicos de sostenibilidad y tecnología, las orientaciones elaboradas por la Agencia Internacional de Energía pueden aportar conocimientos e inspiración. La publicación "Energy Technology Roadmaps: A Guide to Development and Implementation" tiene como objetivo "proporcionar a los países y a las empresas el contexto, la información y las herramientas necesarias para diseñar, gestionar

y aplicar un proceso de hoja de ruta sobre una tecnología energética eficaz y pertinente para sus circunstancias y objetivos locales" (IEA 2014). En ella figuran orientaciones para la determinación de los interesados, la elaboración de una base de referencia tecnológica y la creación de indicadores que ayuden al seguimiento del progreso en relación con los criterios de referencia. El objetivo final de las orientaciones es ayudar a los interesados a asignar

recursos limitados para determinar las prioridades y las medidas de gran impacto a corto plazo, y, al mismo tiempo, sentar las bases y adoptar medidas para lograr mejoras a más largo plazo.

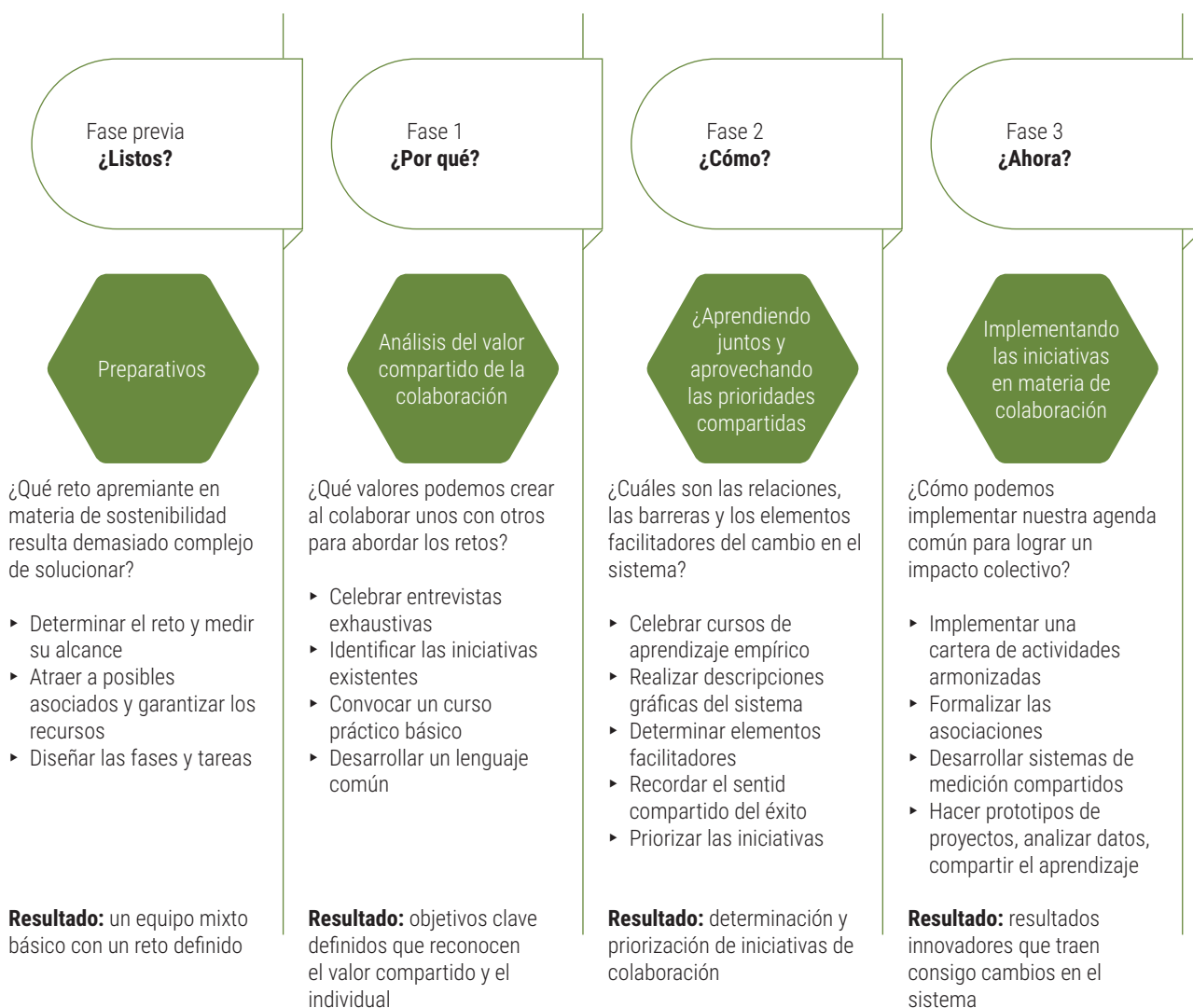
Un proceso de hoja de ruta eficaz comienza por abordar un conjunto de preguntas importantes por adelantado. Entre ellas figuran, por ejemplo (basado en IEA 2014):

- ▶ ¿Cuáles son los límites de la hoja de ruta?
- ▶ ¿Qué temas de la química verde y sostenible se considerarán en la hoja de ruta?
- ▶ ¿Qué expertos externos e interesados deben participar en el proceso?

- ▶ ¿Cuál es el plazo para elaborar la hoja de ruta?
- ▶ ¿Qué oportunidades tecnológicas se están considerando?
- ▶ ¿Cómo la organización principal utilizará e implementará la hoja de ruta?

La figura 8.4 es un ejemplo ilustrativo del proceso de hoja de ruta en la esfera de la tecnología energética. Comprende cuatro etapas, así como una interfaz transversal de Datos y análisis y Opinión de expertos y consenso. Las cuatro etapas incluyen: etapa 1: planificación y preparación; etapa 2: visión; etapa 3: elaboración de la hoja de ruta; y etapa 4: implementación, vigilancia y revisión de la hoja de ruta. Los interesados en la elaboración de una hoja de ruta sobre la química verde y sostenible tal vez

Figura 8.5: “Laboratorios de Transición a la Sostenibilidad” Natural Step (The Natural Step Canada n.d.)



desearán considerar y adaptar esta guía, según corresponda.

### Laboratorios de sostenibilidad para apoyar la elaboración de una hoja de ruta

Una opción para organizar un proceso de hoja de ruta ecológica y de sostenibilidad es organizar un Laboratorio de Sostenibilidad, concepto que reúne a los agentes e interesados clave para abordar una cuestión compleja (McCrary et al. 2020). El objetivo principal de estos Laboratorios es situar la cuestión en el centro del análisis y reconocer que para abordar problemas de sostenibilidad complejos se requiere una colaboración sin precedentes y nuevas formas de trabajar en todos los sectores y a todas las escalas. Un ejemplo de ello es el Programa de Laboratorios de Transición a la Sostenibilidad a nivel coordinado por The Natural Step, que combina la competencia técnica en materia de diseño y facilitación de un cambio transformador hacia la sostenibilidad con enfoques de colaboración con múltiples interesados (The Natural Step 2020b).

### Ha llegado el momento de adoptar medidas estratégicas para promover la química verde y sostenible

Las tendencias y las oportunidades mencionadas en el presente Manual de referencia van todas en una misma dirección. El fomento de la química verde y sostenible trae muchos beneficios, tanto

ambientales como sociales y económicos. Sin embargo, a todos los niveles, el liderazgo en lo que se refiere a aprovechar todo el potencial de la química verde y sostenible es aún insuficiente. Velar por la inclusión del tema en el instrumento que está siendo examinado en el marco del Enfoque Estratégico y la gestión racional de los productos químicos y los desechos después de 2020 puede fortalecer ese objetivo, según proceda.

Además, se alienta a todos los agentes y responsables de la adopción de decisiones, desde los funcionarios públicos, pasando por los directores generales de las empresas, hasta los jefes de los laboratorios de química, a que tengan en cuenta los análisis y las orientaciones ofrecidos en el presente Manual de referencia y a que consideren la posibilidad de comenzar a implementar en sus respectivas organizaciones una hoja de ruta en materia de química verde y sostenible. El PNUMA seguirá estudiando la forma de facilitar de manera eficaz el intercambio de conocimientos entre los países y los interesados y apoyar el fortalecimiento del desarrollo de capacidades. Además, a niveles internacional y nacional y regional, se alienta a los principales interesados, como los Gobiernos y las autoridades regionales y locales, a que coordinen las acciones y preparen, con los interesados pertinentes, un plan de acción coherente (u hoja de ruta). En conjunto, estas actividades podrían mejorar y ampliar la acción concertada mundial en pro del fomento de la química verde y sostenible, incluso en los países en desarrollo y con economías en transición.

**¡Juntos  
haremos de la  
química verde y  
sostenible una  
realidad!**

# REFERENCIAS

Alcántar, K., Blake, A., Edwards, S. and Singla, V. (2017). *Selecting Safer Alternatives to Toxic Chemicals and Ensuring the Protection of the Most Vulnerable*. New York, NY: Selecting Safer Alternatives to Toxic Chemicals and Ensuring the Protection of the Most Vulnerable. <https://www.nrdc.org/sites/default/files/toxic-chemicals-vulnerable-populations-report.pdf>.

American Chemical Society (2015a). *How Industrial Applications in Green Chemistry are Changing our World*. <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/membership/acs/benefits/extra-insights/green-chemistry-applications.pdf>.

American Chemical Society (2015b). Special issue, earth abundant metals in homogeneous catalysis. *Accounts of Chemical Research*. Chirik, P. and Morris, R. (eds.). [https://pubs.acs.org/page/achre4/earth\\_abundant\\_metals.html](https://pubs.acs.org/page/achre4/earth_abundant_metals.html). Accessed 12 December 2020.

American Chemical Society (2020a). 12 design principles of green chemistry. <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>. Accessed 7 December 2020.

American Chemical Society (2020b). The 25th annual green chemistry & engineering conference. ACS Green Chemistry Institute. <https://www.gcande.org/>. Accessed 7 December 2020.

Anastas, P.T. and Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/green-chemistry-theory-and-practice-9780198506980?cc=ch&lang=en&>.

Anastas, P.T. and Zimmerman, J.B. (2003). Design through the 12 principles of green engineering: sustainability requires objectives at the molecular, product, process, and system levels. *Environmental Science & Technology* 37(5), 94A-101A. <https://doi.org/10.1021/es032373g>.

Anastas, P.T. and Zimmerman, J.B. (2019). The periodic table of the elements of green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/c9gc01293a>.

Andrews, E.S., Barthel, L.-P., Tabea, B., Benoît, C., Ciroth, A., Cucuzzella, C., Gensch, C.-O., Hébert, J., Lesage, P., Manhart, A., Mazeau, P., Mazijn, B., Methot, A.-L., Moberg, A., Norris, G., Parent, J., Prakash, S., Reveret, J.-P., Spillemaeckers, S., Ugaya, C.M.L., Valdivia, S. and Weidema, B. (2009). *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products: Social and Socio-Economic LCA Guidelines Complementing Environmental LCA and Life Cycle Costing, Contributing to the Full Assessment of Goods and Services within the Context of Sustainable Development*. Benoît, C. and Mazijn, B. (eds.). Nairobi: United Nations Environment Programme. [http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines\\_slca.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines_slca.pdf).

Arvidsson, R., Hildenbrand, J., Baumann, H., Islam, K.M.N. and Parsmo, R. (2018). A method for human health impact assessment in social LCA: lessons from three case studies. *International Journal of Life Cycle Assessment* 23(3), 690-699. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1116-7>.

Bazzanella, A., Friege, H. and Zeschmar-Lahl, B. (2017). *Identification of Priority Topics in the Field of Sustainable Chemistry*. Dessau-Roßlau: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/identification-of-priority-topics-in-the-field-of>.

BCC Research (2016). Global concerns promoting growth of 'green' chemistry markets, reports BCC Research, 4 April. *Marketwired*. <https://www.bccresearch.com/pressroom/env/global-concerns-promoting-growth-of-green-chemistry-markets>. Accessed 24 June 2020.

Becker, M. and Tickner, J.A. (2020). Driving safer products through collaborative innovation: lessons learned from the Green Chemistry & Commerce Council's collaborative innovation challenge for safe and effective preservatives for consumer products. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 18(100330), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100330>.

Bell, G., Schuck, S., Jungmeier, G., Wellisch, M., Felby, C., Jørgensen, H., Stichnothe, H., Clancy, M., De Bari, I., Kimura, S., van Ree, R., de Jong, E., Annevelink, B., Kwant, K., Torr, K. and Spaeth, J. (2014). *Task Force 42 Biorefining: Sustainable and Synergetic Processing of Biomass into Marketable Food & Feed Ingredients, Products (Chemicals, Materials) and Energy (Fuels, Power, Heat) The Netherlands (Coordinator) Electronic Copies*. van Ree, R. and van Zeeland, A. (eds.). Wageningen: IEA Bioenergy. [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2014/09/IEA-Bioenergy-Task42-Biorefining-Brochure-SEP2014\\_LR.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2014/09/IEA-Bioenergy-Task42-Biorefining-Brochure-SEP2014_LR.pdf).

Benjamin, S., Masai, E., Kamimura, N., Takahashi, K., Anderson, R.C. and Faisal, P.A. (2017). Phthalates impact human health: epidemiological evidences and plausible mechanism of action. *Journal of Hazardous Materials* 340, 360-383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.036>.



- Bhadani, A., Kafle, A., Ogura, T., Akamatsu, M., Sakai, K., Sakai, H. and Abe, M. (2020). Current perspective of sustainable surfactants based on renewable building blocks. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 45, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.01.002>.
- Bisgaard, T. and Tuck, K. (2014). *The Business Case for Eco-Innovation*. Pegram, J., Madhuvanthe and Panild, U.N. (eds.). Nairobi: United Nations Environment Programme. [http://unep.ecoinnovation.org/wp-content/uploads/2017/07/UN\\_Environment\\_Eco—i\\_Business-case.pdf](http://unep.ecoinnovation.org/wp-content/uploads/2017/07/UN_Environment_Eco—i_Business-case.pdf).
- Blum, C., Bunke, D., Hungsberg, M., Roelofs, E., Joas, A., Joas, R., Blepp, M. and Stolzenberg, H.-C. (2017). The concept of sustainable chemistry: key drivers for the transition towards sustainable development. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 5, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2017.01.001>.
- Bocqué, M., Voirin, C., Lapinte, V., Caillol, S. and Robin, J.J. (2015). Petro-based and bio-based plasticizers: chemical structures to plasticizing properties. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry* 54(1), 11-33. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pola.27917>.
- Broman, G.I. and Robèrt, K.H. (2017). A framework for strategic sustainable development. *Journal of Cleaner Production* 140, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.121>.
- Buckley, H.L., Hart-Cooper, W.M., Kim, J.H., Faulkner, D.M., Cheng, L.W., Chan, K.L., Vulpe, C.D., Orts, W.J., Amrose, S.E. and Mulvihill, M.J. (2017). Design and testing of safer, more effective preservatives for consumer products. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 5(5), 4320-4331. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00374>.
- Buhl, A., Schmidt-Keilich, M., Muster, V., Blazejewski, S., Schrader, U., Harrach, C., Schäfer, M. and Süßbauer, E. (2019). Design thinking for sustainability: why and how design thinking can foster sustainability-oriented innovation development. *Journal of Cleaner Production* 231, 1248-1257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.259>.
- Business Wire (2015). BASF and solazyme launch the first commercial microalgae-derived betaine surfactant, 28 July. <https://www.businesswire.com/news/home/20150728005434/en/BASF-Solazyme-Launch-Commercial-Microalgae-Derived-Betaine-Surfactant>. Accessed 7 December 2020.
- Business Wire (2019). Global green chemicals market will grow at a CAGR of 10% during 2019-2023, 29 May. *Technavio Research*. <https://www.businesswire.com/news/home/20190529005081/en/Global-Green-Chemicals-Market-Will-Grow-at-a-CAGR-of-10-During-2019-2023-Technavio>. Accessed 11 December 2020.
- Buxton, L. (2016). Hoffmann-La Roche's goal to phase out SVHCs, December. *Chemical Watch*. <https://chemicalwatch.com/51621/hoffmann-la-roches-goal-to-phase-out-svhcs>. Accessed 26 June 2020.
- Carroll, W.F. (2019). Mapping out the future of green chemistry education. *Chemical & Engineering News* 97(31). <https://cen.acs.org/acs-news/comment/Mapping-future-green-chemistry-education/97/i31>.
- Chakraborty, S., Leitus, G. and Milstein, D. (2016). Selective hydrogenation of nitriles to primary amines catalyzed by a novel iron complex. *Chemical Communications* 52(9), 1812-1815. <https://doi.org/10.1039/c5cc08204h>.
- Chemie<sup>3</sup> (n.d.). Wesentlichkeitsanalyse: der chemie3-nachhaltigkeits-check. <https://www.chemiehoch3.de/nachhaltigkeitscheck/>. Accessed 15 December 2020.
- Clark, J.H. (2006). Green chemistry: today (and tomorrow). *Green Chemistry* 8(1), 17-21. <https://doi.org/10.1039/b516637n>.
- Davies, D.W., Butler, K.T., Jackson, A.J., Morris, A., Frost, J.M., Skelton, J.M. and Walsh, A. (2016). Computational screening of all stoichiometric inorganic materials. *Chem* 1(4), 617-627. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.09.010>.
- Elgie, S. and Brownlee, M. (2017). *Accelerating Clean Innovation in Canada*. Ottawa: Smart Prosperity Institute. <https://institute.smartprosperity.ca/sites/default/files/acceleratingcleaninnovationincanada.pdf>.
- Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y.M. and Milo, R. (2020). Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature* 588(7838), 442-444. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>.
- Elsevier (2020). 5th green & sustainable chemistry conference: online – live and on-demand | 10-11 November 2020. <https://www.elsevier.com/events/conferences/green-and-sustainable-chemistry-conference>. Accessed 7 December 2020.
- Elsevier (2020b). 2020 Elsevier green and sustainable chemistry challenge. <https://www.elsevier.com/events/conferences/green-and-sustainable-chemistry-conference/about/green-and-sustainable-chemistry-challenge>. Accessed 14 December 2020.
- Ernst & Young (2016). *Green Bonds: A Fresh Look at Financing Green Projects*. [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Green\\_bonds-a-fresh-look-at-financing-green-projects/\\$FILE/EY-Green%20bonds-a-fresh-look-at-financing-green-projects.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Green_bonds-a-fresh-look-at-financing-green-projects/$FILE/EY-Green%20bonds-a-fresh-look-at-financing-green-projects.pdf).
- Erythropel, H., Börmann, A., Nicell, J., Leask, R. and Maric, M. (2018). Designing green plasticizers: linear alkyl diol dibenzoate plasticizers and a thermally reversible plasticizer. *Polymers* 10(6), 646. <https://doi.org/10.3390/polym10060646>.
- Etzkowitz, H., Ranga, M., Benner, M., Guarany, L., Maculan, A.M. and Kneller, R. (2008). Pathways to the entrepreneurial university: towards a global convergence. *Science and Public Policy* 35(9), 681-695. <https://doi.org/10.3152/030234208x389701>.

- European Chemicals Agency (2011). *Guidance on the Preparation of an Application for Authorisation*. Version 1. [https://echa.europa.eu/documents/10162/13643/authorisation\\_application\\_en.pdf](https://echa.europa.eu/documents/10162/13643/authorisation_application_en.pdf).
- European Commission (1996). Council Directive 96/61/EC of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control. *Official Journal of the European Communities L(257)*, 26-40. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.1996.257.01.0026.01.ENG&toc=OJ:L:1996:257:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.1996.257.01.0026.01.ENG&toc=OJ:L:1996:257:TOC).
- European Commission (2011). *Opinion on Parabens: COLIPA N° P82. SCCS/1348/10*. Brussels: Scientific Committee on Consumer Safety. <https://doi.org/10.2772/30176>.
- European Commission (2019). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal*. COM(2019) 640 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2>.
- European Commission (2020). Chemicals strategy: the EU's chemicals strategy for sustainability towards a toxic-free environment. [https://ec.europa.eu/environment/strategy/chemicals-strategy\\_en](https://ec.europa.eu/environment/strategy/chemicals-strategy_en). Accessed 14 December 2020.
- European Commission (n.d.). Sustainable products initiative. <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12567-Sustainable-products-initiative>. Accessed 14 December 2020.
- European Commission and Organisation for Economic Co-operation and Development (2012). *A Guiding Framework for Entrepreneurial Universities*. <https://www.oecd.org/site/cfecpr/EC-OECD%20Entrepreneurial%20Universities%20Framework.pdf>.
- European Technology Platform for Sustainable Chemistry (2019). *Strategic Innovation and Research Agenda: Innovation Priorities for EU and Global Challenges*. Brussels. <http://www.suschem.org/highlights/suschem-identifies-key-technology-priorities-to-address-eu-and-global-challenges-in-its-new-strategic-research-and-innovation-agenda>.
- Fanelli, F., Parisi, G., Degennaro, L. and Luisi, R. (2017). Contribution of microreactor technology and flow chemistry to the development of green and sustainable synthesis. *Beilstein Journal of Organic Chemistry* 13, 520-542. <https://doi.org/10.3762/bjoc.13.51>.
- Fantke, P. and Illner, N. (2019). Goods that are good enough: introducing an absolute sustainability perspective for managing chemicals in consumer products. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 15, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.12.001>.
- Fermeglia, M., Longo, G. and Toma, L. (2009). Computer aided design for sustainable industrial processes: specific tools and applications. *AIChE Journal* 55(4), 1065-1078. <https://doi.org/10.1002/aic.11730>.
- Freire, M.G. and Coutinho, J.A.P. (2019). Editorial overview: a closer look on sustainable solvents and processes. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 18, A4-A6. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.07.003>.
- Gauthier, A.M., Fung, M., Panko, J., Kingsbury, T., Perez, A.L., Hitchcock, K., Ferracini, T., Sahmel, J., Banducci, A., Jacobsen, M., Abelmann, A. and Shay, E. (2014). Chemical assessment state of the science: evaluation of 32 decision-support tools used to screen and prioritize chemicals. *Integrated Environmental Assessment and Management* 11(2), 242-255. <https://doi.org/10.1002/ieam.1605>.
- Gaona, S. (2017). The Utility of the Toxic Release Inventory (TRI) in Tracking Implementation and Environmental Impact of Industrial Green Chemistry Practices in the United States. *Green Chemistry*, 147. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70716>
- Gee, D., Grandjean, P., Hansen, S.F., van den Hove, S., MacGarvin, M., Martin, J., Nielsen, G., Quist, D. and Stanners, D. (2013). *Late Lessons from Early Warnings: Science, Precaution, Innovation: Summary*. No 1/2013. Copenhagen: European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2>.
- German Environment Agency (2009). *Sustainable Chemistry: Positions and Criteria of the Federal Environment Agency*. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3798.pdf>.
- German Ministry of Education and Research and German Ministry of Food and Agriculture (2020). *National Bioeconomy Strategy: Summary*. [https://www.bmbf.de/files/2020\\_1501\\_National-Bioeconomy-Strategy\\_Summary\\_accessible.pdf](https://www.bmbf.de/files/2020_1501_National-Bioeconomy-Strategy_Summary_accessible.pdf).
- Government of the United States (n.d.). Indicator 12.6.1: number of companies publishing sustainability reports. *U.S. National Statistics for the U.N. Sustainable Development Goals*. <https://sdg.data.gov/12-6-1/>. Accessed 14 December 2020.
- Green Chemistry & Commerce Council (n.d.). GC3 publications. *Lowell Center for Sustainable Production*. <https://greenchemistryandcommerce.org/resources/gc3-publications>. Accessed 11 December 2020.
- Green Science Policy Institute (2013). Pop Stop: Denmark retailer stops sale of microwave popcorn amid health fears, 3 June. <http://greensciencepolicy.org/pop-stop/>. Accessed 24 June 2020.
- GreenCentre Canada (2020). About us. <https://greencentrecanada.com/about-us/>. Accessed 14 December 2020.

- GreenScreen (2020) GreenScreen for safer chemicals. <https://www.greenscreenchemicals.org/>. Accessed 24 June 2020.
- Harmon, J.P. and Otter, R. (2017). Green chemistry and the search for new plasticizers. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 6(2), 2078-2085. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03508>.
- Health and Safety Executive (2003). *HSE Information Sheet - Solvents: Construction Information Sheet No 27 (Revision 2)*. <https://www.hse.gov.uk/pUbns/cis27.pdf>.
- Hellweg, S. and Milà i Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*. 344(6188), 1109-1113. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>.
- Hill, J., Kumar, D.D. and Verma, R.K. (2013). Challenges for chemical education: engaging with green chemistry and environmental sustainability. *Journal of the American Institute of Chemists* 86(1), 24-31. [http://www.theaic.org/pub\\_thechemist\\_journals/Vol-86-No-1/Vol-86-No1-Article-5.pdf](http://www.theaic.org/pub_thechemist_journals/Vol-86-No-1/Vol-86-No1-Article-5.pdf).
- Howell, B.A., Daniel, Y.G. and Ostrander, E.A. (2018). Flame retardants from renewable sources: food waste, plant oils, and starch. In *Green Polymer Chemistry: New Products, Processes, and Applications*. Cheng, H.N., Gross, R.A. and Smith, P.B. (eds.). Washington, DC: American Chemical Society. Chapter 25. 405-421. <https://doi.org/10.1021/bk-2018-1310.ch025>.
- Howell, B.A., Oberdorfer, K.L. and Ostrander, E.A. (2018). Phosphorus flame retardants for polymeric materials from gallic acid and other naturally occurring multihydroxybenzoic acids. *International Journal of Polymer Science* 2018, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2018/7237236>.
- Innovation for Sustainable Development Network (2019). Chromatogeny: green chemistry to make paper water-repellent, 18 April. <https://www.inno4sd.net/chromatogeny-green-chemistry-to-make-paper-water-repellent-246>. Accessed 7 December 2020.
- International Bank for Reconstruction and Development and World Bank (2017). *What Are Green Bonds?* <http://documents.worldbank.org/curated/en/400251468187810398/pdf/99662-REVISED-WB-Green-Bond-Box393208B-PUBLIC.pdf>.
- International Energy Agency (2014). *Energy Technology Roadmap: A Guide to Development and Implementation*. <https://webstore.iea.org/download/direct/443>.
- International Energy Agency (2019). *Putting CO2 to Use: Creating Value from Emissions*. <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>.
- International Labour Organization (2000). *ABC of Women Workers' Rights and Gender Equality*. 1st edn. [http://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS\\_080613/lang-en/index.htm](http://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS_080613/lang-en/index.htm).
- International Organization for Standardization (2016). *ISO 14040:2006(En) Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework*. ISO/TC 207/SC 5 Life cycle assessment. 2nd edn. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (2020a). ISC3 - International Sustainable Chemistry Collaborative Centre: activities. <https://www.isc3.org/en/activities/collaboration.html>. Accessed 7 December 2020.
- International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (2020b). Finalists of the ISC3 innovation challenge in sustainable building and living 2019/20 selected! <https://www.isc3.org/en/activities/innovation/innovation-challenge.html>. Accessed 14 December 2020.
- Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals (2018). *Chemicals and Waste Management: Essential to Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs)*. [http://www.who.int/iomc/Chemicals\\_SDGs\\_interactive\\_Feb2018.pdf](http://www.who.int/iomc/Chemicals_SDGs_interactive_Feb2018.pdf).
- Jackson, D.J. (2011). *What Is an Innovation Ecosystem?* Arlington, VA: National Science Foundation. <http://www.sustainablescale.org/ConceptualFramework/UnderstandingScale/BasicConcepts/EcosystemFunctionsServices.aspx>.
- Jamarani, R., Erythropel, H., Nicell, J., Leask, R. and Marić, M. (2018). How green is your plasticizer? *Polymers* 10(8), 834-851. <https://doi.org/10.3390/polym10080834>.
- Jimenez-Gonzalez, C., Ponder, C.S., Broxterman, Q.B. and Manley, J.B. (2011). Using the right green yardstick: why process mass intensity is used in the pharmaceutical industry to drive more sustainable processes. *Organic Process Research and Development* 15(4), 912-917. <https://doi.org/10.1021/op200097d>.
- Joas, R. Abraham, V. and Joas, A. (2018). Chemical leasing: a business model to drive resource efficiency in the supply chain, In *Factor X*. Chapter 28. 395-403. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50079-9\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50079-9_28).
- Johnston, J. and Cushing, L. (2020). Chemical exposures, health, and environmental justice in communities living on the fenceline of industry. *Current Environmental Health Reports* 7(1), 48-57. <https://doi.org/10.1007/s40572-020-00263-8>.
- Kalantari, F., Tahir, O.M., Joni, R.A. and Fatemi, E. (2018). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: a review. *Journal of Landscape Ecology* 11(1), 35-60. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016>.

- Kandasamy, R., Rajasekaran, M., Venkatesan, S.K. and Uddin, M. (2019). New trends in the biomanufacturing of green surfactants: biobased surfactants and biosurfactants. In *Next Generation Biomanufacturing Technologies*. Rathinam, N.K. and Sani, R.K. (eds.). Washington, DC: American Chemical Society. Chapter 11. 243-260. <https://doi.org/10.1021/bk-2019-1329.ch011>.
- Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M. and Hankamer, B. (2019). Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. *Trends in Plant Science* 24(3), 237-249. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.010>.
- Kaushik, M. and Moores, A. (2017). New trends in sustainable nanocatalysis: emerging use of earth abundant metals. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 7, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.07.002>.
- Kaya, M. and Tabak, A. (2020). Recycling of an agricultural bio-waste as a novel cellulose aerogel: a green chemistry study. *Journal of Polymers and the Environment* 28(1), 323-330. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01609-6>.
- Kershaw, P.J. (2015). *Biodegradable Plastics and Marine Litter: Misconceptions, Concerns and Impacts on Marine Environments*. Nairobi: United Nations Environment Programme. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7468>.
- King, A. (2017). Technology: the future of agriculture. *Nature* 544(7651), S21-S23. <https://doi.org/10.1038/544s21a>.
- Kirkpatrick, P. and Ellis, C. (2004). Chemical space. *Nature* 432(7019), 823-823. <https://doi.org/10.1038/432823a>.
- Klofsten, M., and Jones-Evans, D. (2000). Comparing academic entrepreneurship in Europe – the case of Sweden and Ireland. *Small Business Economics* 14(4), 299-309. <https://doi.org/10.1023/A:1008184601282>.
- Kobayashi, S., Uyama, H. and Kadokawa, J. (eds.) (2019). *Enzymatic Polymerization towards Green Polymer Chemistry. Green Chemistry and Sustainable Technology. Gateway East: Springer Singapore*. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3813-7>.
- Kohli, K., Prajapati, R. and Sharma, B. (2019). Bio-based chemicals from renewable biomass for integrated biorefineries. *Energies* 12(2), 1-40. <https://doi.org/10.3390/en12020233>.
- Kümmerer, K. (2017). Sustainable chemistry: a future guiding principle. *Angewandte Chemie International Edition* 56(52), 16420-16421. <https://doi.org/10.1002/anie.201709949>.
- Kümmerer, K., Clark, J.H. and Zuin, V.G. (2020). Rethinking chemistry for a circular economy. *Science* 367(6476), 369-370. <https://doi.org/10.1126/science.aba4979>.
- Laoutid, F., Karaseva, V., Costes, L., Brohez, S., Mincheva, R. and Dubois, P. (2018). Novel bio-based flame retardant systems derived from tannic acid. *Journal of Renewable Materials* 6(6), 559-572. <https://doi.org/10.32604/jrm.2018.00004>.
- Larcher, D. and Tarascon, J.-M. (2015). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry* 7(1), 19-29. <https://doi.org/10.1038/nchem.2085>.
- Linthorst, J.A. (2010). An overview: origins and development of green chemistry. *Foundations of Chemistry* 12(1), 55-68. <https://doi.org/10.1007/s10698-009-9079-4>.
- Lipinski, D. (2019). *H.R.2051: Sustainable Chemistry Research and Development Act of 2019*. 116th Congress (2019-2020). Washington, DC: United States Congress. <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/2051>.
- Liu, D. and Chen, E.Y.X. (2014). Organocatalysis in biorefining for biomass conversion and upgrading. *Green Chemistry* 16(3), 964-981. <https://doi.org/10.1039/c3gc41934g>.
- Lopes Da Silva, C.E., Baptista Narcizo, R. and Cardoso, R. (2012). The proximity between academy, industry and government: towards a more sustainable development of a Brazilian oil region. Selection and/or peer review under responsibility of Institut Teknologi Bandung. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 52, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.446>.
- Malairaja, C. and Zawdie, G. (2008). Science parks and university–industry collaboration in Malaysia. *Technology Analysis & Strategic Management* 20(6), 727-739. <https://doi.org/10.1080/09537320802426432>.
- McCrorry, G., Schöpke, N., Holmén, J. and Holmberg, J. (2020). Sustainability-oriented labs in real-world contexts: an exploratory review. *Journal of Cleaner Production* 277(123202), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123202>.
- Meninno, S. (2020). Valorization of waste: sustainable organocatalysts from renewable resources. *ChemSusChem* 13(3), 437-437. <https://doi.org/10.1002/cssc.202000007>.
- Mubofu, E.B. (2016). Castor oil as a potential renewable resource for the production of functional materials. *Sustainable Chemical Processes* 4(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40508-016-0055-8>.
- Northwest Product Stewardship Council (n.d.). What is product stewardship? <http://productstewardship.net/about/what-product-stewardship>. Accessed 14 December 2020.
- NSF International (n.d.). *Questions and Answers on NSF/GCI 355: Greener Chemicals and Processes Information Standard*. [https://d2evkimvhatqav.cloudfront.net/documents/GC\\_355\\_Insert\\_LT\\_EN\\_LGC26050812.pdf](https://d2evkimvhatqav.cloudfront.net/documents/GC_355_Insert_LT_EN_LGC26050812.pdf).



- Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., Clement, J., Cabernard, L., Che, N., Chen, D., Droz-Georget, H., Ekins, P., Fischer-Kowalski, M., Flörke, M., Frank, S., Froemelt, A., Geschke, A., Haupt, M., Havlik, P., Hüfner, R., Lenzen, M., Lieber, M., Liu, B., Lu, Y., Lutter, S., Mehr, J., Miatto, A., Newth, D., Oberschelp, C., Obersteiner, M., Pfister, S., Piccoli, E., Schaldach, R., Schüngel, J., Sonderegger, T., Sudheshwar, A., Tanikawa, H., van der Voet, E., Walker, C., West, J., Wang, Z. and Zhu, B. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. A report of the International Resource Panel. Nairobi: United Nations Environment Programme. <http://www.resourcepanel.org/file/1172/download?token=muaxPxoQ>.
- Ocampo-López, C., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L. and Vélez-Salazar, Y. (2019). Applied research in biotechnology as a source of opportunities for green chemistry start-ups. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 11, 41-45. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.12.005>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2010). *OECD Global Forum on Environment Focusing on Sustainable Materials Management: Policy Report 1 - Policy Principles for Sustainable Materials Management Working Document*. <http://www.oecd.org/env/waste/46111789.pdf>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2012). *The Role of Government Policy in Supporting the Adoption of Green/Sustainable Chemistry Innovations*. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=en/jm/mono\(2012\)3&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=en/jm/mono(2012)3&doclanguage=en).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2018). Sustainable chemistry. <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/sustainablechemistry.htm>. Accessed 20 June 2020.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (n.d.). Extended producer responsibility. <https://www.oecd.org/env/tools-evaluation/extendedproducerresponsibility.htm>. Accessed 14 December 2020.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (n.d.). Database on policy instruments for the environment. <https://pinedatabase.oecd.org/>. Accessed 24 June 2020.
- Oviatt, B.M. and McDougall, P.P. (2005). Toward a theory of international new ventures. *Journal of International Business Studies* 36(1), 29-41. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8400128>.
- Panko, J., Hitchcock, K., Fung, M., Spencer, P., Kingsbury, T. and Mason, A. (2017). A comparative evaluation of five hazard screening tools. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 13(1), 139-154. <https://doi.org/10.1002/ieam.1757>.
- Peabody O'Brien, K., Franjevic, S. and Jones, J. (2009). *Green Chemistry and Sustainable Agriculture: The Role of Biopesticides*. Charlottesville, VA: Advancing Green Chemistry. <http://advancinggreenchemistry.org/wp-content/uploads/Green-Chem-and-Sus.-Ag.-the-Role-of-Biopesticides.pdf>.
- Phaal, R., Farrukh, C.J.P. and Probert, D.R. (2004). Technology roadmapping - a planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting and Social Change* 71(1-2), 5-26. [https://doi.org/10.1016/s0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/s0040-1625(03)00072-6).
- Philp, J.C., Ritchie, R.J. and Allan, J.E.M. (2013). Biobased chemicals: the convergence of green chemistry with industrial biotechnology. *Trends in Biotechnology* 31(4), 219-222. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.12.007>.
- Pike Research (2011). Green chemistry: biobased chemicals, renewable feedstocks, green polymers, less-toxic alternative chemical formulations, and the foundations of a sustainable chemical industry. *Industrial Biotechnology* 7(6), 431-433. <https://doi.org/10.1089/ind.2011.1003>.
- Platt, D. (2004). Terry Collins develops 'green' catalysts for potential use in industry and biological warfare, 8 April. *Carnegie Mellon Today*. [https://www.cmu.edu/cmnews/extra/030911\\_saferliving.html](https://www.cmu.edu/cmnews/extra/030911_saferliving.html). Accessed 10 December 2020.
- Pradeep, P., Friedman, K.P. and Judson, R. (2020). Structure-based QSAR models to predict repeat dose toxicity points of departure. *Computational Toxicology* 16, 100139. <https://doi.org/10.1016/j.comtox.2020.100139>.
- Ravelli, D., Dondi, D., Fagnoni, M. and Albin, A. (2009). Photocatalysis. a multi-faceted concept for green chemistry. *Chemical Society Reviews* 38(7), 1999-2011. <https://doi.org/10.1039/b714786b>.
- ReportLinker (2020). Global green chemicals industry, 7 July. *GlobeNewswire*. <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/07/07/2058992/0/en/Global-Green-Chemicals-Industry.html>. Accessed 25 January 2021.
- RoadToBio (2020). Welcome to RoadToBio: roadmap for the chemical industry in Europe towards a bioeconomy. <https://www.roadtobio.eu/>. Accessed 15 December 2020.
- Rossi, M.S., Edwards, S., Peele, C. and Greiner, T. (2017). *The Chemical Footprint Project: 2017 Annual Report*. Chemical Footprint Project. <https://www.chemicalfootprint.org/results/2017-report>.
- Royal Society of Chemistry (2020). Energy: supporting the chemical science community to help create a sustainable energy future. <https://www.rsc.org/campaigning-outreach/global-challenges/energy/#solarfuels>. Accessed 14 December 2020.

- Ryberg, M.W.R., Laurent, A. and Hauschild, M. (2018). *Mapping of Global Plastics Value Chain and Plastics Losses to the Environment: With a Particular Focus on Marine Environment*. Nairobi: United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26745>.
- Ryzhonkov, V. (2013). Innovation ecosystem model, 3 August. *Entrepreneurship, Business Incubation, Business Models & Strategy Blog*. <https://worldbusinessincubation.wordpress.com/2013/08/04/demand-not-the-infrastructure-is-the-cornerstone-of-successful-innovation-ecosystem/innovation-ecosystem-model-2/>. Accessed 25 June 2020.
- Sarkis, J. (ed.) (2019). *Handbook on the Sustainable Supply Chain*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781786434272>.
- ScienceDaily (2019). Artificial photosynthesis transforms carbon dioxide into liquefiable fuel, 22 May. *University of Illinois at Urbana-Champaign, News Bureau*. <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/05/190522153121.htm>. Accessed 14 December 2020.
- Sheldon, R.A. (2017). The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry* 19(1), 18-43. <https://doi.org/10.1039/c6gc02157c>.
- Sheldon, R.A. (2019). The greening of solvents: towards sustainable organic synthesis. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 18, 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.11.006>.
- Sheldon, R.A. and Brady, D. (2019). Broadening the scope of biocatalysis in sustainable organic synthesis. *ChemSusChem* 12(13), 2859-2881. <https://doi.org/10.1002/cssc.201900351>.
- Sheldon, R.A. and Woodley, J.M. (2018). Role of biocatalysis in sustainable chemistry. *Chemical Reviews* 118(2), 801-838. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00203>.
- Sheu, J.B. and Choi, T.M. (2019). Extended consumer responsibility: syncretic value-oriented pricing strategies for trade-in-for-upgrade programs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 122, 350-367. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.016>.
- Smith, N.C. and Jarisch, D. (2019). INEOS chlorvinyls: a positive vision for PVC (a). In *Managing Sustainable Business*. Lenssen, G.G. and Smith, N.C. (eds.). Dordrecht: Springer Netherlands. Chapter 5. 83-102. [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1144-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1144-7_5).
- Sourcemap (2012). *iPhone 5*. [Map]. <https://open.sourcemap.com/maps/57d28966df2ac24b524c8ffb>. Accessed 24 June 2020.
- SpecialChem (2015). Organic monitor discusses future of green surfactants & emulsifiers in its latest study, 4 September. *Industry News*. <https://cosmetics.specialchem.com/news/industry-news/organic-monitor-discusses-future-of-green-surfactants-emulsifiers-000177331>. Accessed 7 December 2020.
- Stavins, R.N. (2001). *Experience with Market-Based Environmental Policy Instruments*. Discussion Paper. No. 01-58. Washington, D.C.: Resources for the Future. <https://ageconsearch.umn.edu/record/10909/files/dp010058.pdf>.
- Sterner, T. and Coria, J. (2011). *Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management*. 2nd edn. Washington, D.C.: Resources for the Future. <https://doi.org/10.4324/9781315780894>.
- Stockholm Resilience Centre (2016). How food connects all the SDGs. <http://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-how-food-connects-all-the-sdgs.html>. Accessed 26 June 2020.
- Styring, P., Jansen, D., de Coninck, H., Reith, H. and Armstrong, K. (2012). *Carbon Capture and Utilisation in the Green Economy: Using CO<sub>2</sub> to Manufacture Fuel, Chemicals and Materials*. York: The Centre for Low Carbon Futures and CO2Chem Publishing. <https://www.semanticscholar.org/paper/Carbon-Capture-and-Utilisation-in-the-green-economy-Coninck-ECN/5d2c7d791478526465b2d5dd68d7962414b34526>.
- Sustainable Packaging Coalition (2020). For people + the planet. <https://sustainablepackaging.org/>. Accessed 14 December 2020.
- Temper, L., Demaria, F., Scheidel, A., Del Bene, D. and Martinez-Alier, J. (2018). The Global Environmental Justice Atlas (EJAtlas): ecological distribution conflicts as forces for sustainability. *Sustainability Science* 13(3), 573-584. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0563-4>.
- The Natural Step (2020a). Our approach: the natural step framework. <https://thenaturalstep.org/approach/>. Accessed 15 December 2020.
- The Natural Step (2020b). Transition labs. <https://thenaturalstep.org/services/transition-labs/>. Accessed 15 December 2020.
- The Natural Step Canada (n.d.). Sustainability transition lab process. <http://www.naturalstep.ca/sustainability-transition-lab-process>. Accessed 15 December 2020.
- Together for Sustainability (2020). What is TFS? <https://tfs-initiative.com/>. Accessed 14 December 2020.
- United Nations Conference on Trade and Development (2019). *Methodology for SDG Indicator 12.6.1: Proposal from the Custodian Agencies*. [https://environmentlive.unep.org/media/docs/projects/draft\\_proposal\\_methodology\\_12\\_6\\_1\\_may\\_2019.pdf](https://environmentlive.unep.org/media/docs/projects/draft_proposal_methodology_12_6_1_may_2019.pdf).
- United Nations Economic Commission for Europe (2012). *Innovation Review Performance Kazakhstan*. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/ceci/publications/icp5.pdf>.

- United Nations Environment Programme (2017a). *Guidelines for Providing Product Sustainability Information: Global Guidance on Making Effective Environmental, Social and Economic Claims, to Empower and Enable Consumer Choice*. [https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/guidelines\\_for\\_providing\\_product\\_sustainability\\_information\\_ciscp\\_2017\\_revised.pdf](https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/guidelines_for_providing_product_sustainability_information_ciscp_2017_revised.pdf).
- United Nations Environment Programme (2017b). *Advancing Entrepreneurship and Start-up Initiatives for Sustainable Chemistry: Learning from Case Studies. Compilation of Case Studies*. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22044/SC%20Startup%20WS\\_Case%20Studies%20Compilation\\_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22044/SC%20Startup%20WS_Case%20Studies%20Compilation_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- United Nations Environment Programme (2019a). *Analysis of Stakeholder Submissions on Sustainable Chemistry Pursuant to UNEA Resolution 2/7*. SAICM/OEWG.3/INF/22. <http://www.saicm.org/Portals/12/Documents/meetings/OEWG3/inf/OEWG3-INF-22-Analysis.pdf>.
- United Nations Environment Programme (2019b). *Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions - Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28113/GCOII.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- United Nations Environment Programme (2019c). *UNEP circularity platform*. [https://buildingcircularity.org/wp-content/uploads/2019/11/Circularity\\_Diagram\\_UNEP.pdf](https://buildingcircularity.org/wp-content/uploads/2019/11/Circularity_Diagram_UNEP.pdf).
- United Nations Environment Programme (2020). *Life cycle initiative*. <https://www.lifecycleinitiative.org/>. Accessed 14 December 2020.
- United Nations Industrial Development Organization (2017). *Industrial Development Report 2018. Demand for Manufacturing: Driving Inclusive and Sustainable Industrial Development*. <https://www.unido.org/news/industrial-development-report-2018-launched>.
- United Nations Industrial Development Organization (2020). *What is CSR?* <https://www.unido.org/our-focus/advancing-economic-competitiveness/competitive-trade-capacities-and-corporate-responsibility/corporate-social-responsibility-market-integration/what-csr>. Accessed 14 December 2020.
- United States Environmental Protection Agency (2017). *Sustainable materials management: non-hazardous materials and waste management hierarchy*, 10 August. <https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-non-hazardous-materials-and-waste-management-hierarchy>. Accessed 26 June 2020.
- United States Environmental Protection Agency (2020a). *Sustainable materials management*, 30 October. <https://www.epa.gov/smm>. Accessed 14 December 2020.
- United States Environmental Protection Agency (2020b). *Information about the green chemistry challenge*, 12 September. <https://www.epa.gov/greenchemistry/information-about-green-chemistry-challenge>. Accessed 14 December 2020.
- United States Government Accountability Office (2018). *Chemical Innovation: Technologies to Make Processes and Products More Sustainable*. <https://www.gao.gov/products/GAO-18-307>.
- United States National Research Council (2014). *A Framework to Guide Selection of Chemical Alternatives*. Washington, D.C.: National Academies Press. <http://www.nap.edu/catalog/18872>.
- United States Occupational Safety and Health Administration (n.d.). *Transitioning to safer chemicals: a toolkit for employers and workers*. [https://www.osha.gov/dsg/safer\\_chemicals/index.html](https://www.osha.gov/dsg/safer_chemicals/index.html). Accessed 15 December 2020.
- van der Waals, J., Bougas, K., Keyte, I., Kreissig, J. and Smit, J. (2018). *Safe Chemicals Innovation Agenda: Towards a Research Agenda for Safe Chemicals, Materials and Products*. The Hague: The Netherlands, Ministry of Infrastructure and Water Management. <https://www.chemischestoffengoeedgeregeld.nl/sites/default/files/39982%20-%20Safe%20Chemicals%20Innovation%20Agenda%20-%2020180613i6%20final%20copy.pdf>.
- Van Hamelen, E. (2018). *Without Chemistry There Can Be No Circular Economy: The Imperative of a New Perspective on Chemicals and Materials Management*. Planegg: The Natural Step. <https://thenaturalstep.org/wp-content/uploads/2018/05/20180508-Circular-chemistry-EN-BioEDIT-TNSinternational.pdf>.
- Verster, B., Madonsela, Z., Minnaar, S., Cohen, B. and Harrison, S.T.L. (2014). *Introducing the Wastewater Biorefinery Concept: A Scoping Study of Poly-Glutamic Acid Production from a Bacillus-Rich Mixed Culture Using Municipal Wastewater*. WRC Report No. TT 587/13. Cape Town: Water Research Commission. [https://www.researchgate.net/publication/283048384\\_Introducing\\_the\\_wastewater\\_biorefinery\\_concept](https://www.researchgate.net/publication/283048384_Introducing_the_wastewater_biorefinery_concept).
- Vitale, M.R., Oudeyer, S., Levacher, V. and Brière, J.-F. (2016). *Radical and Ion-Pairing Strategies in Asymmetric Organocatalysis*. London: ISTE Press Ltd and Elsevier Ltd. <https://www.sciencedirect.com/book/9781785481277/radical-and-ion-pairing-strategies-in-asymmetric-organocatalysis>.
- Voorhees, K. and Hutchison, J.E. (2015). *Green chemistry education roadmap charts the path ahead*. *Chemical & Engineering News Archive* 93(38), 46. <https://doi.org/10.1021/cen-09338-comment>.
- Waerder, B., Stinnes, S. and Erdenberger, O. (2017). *Design thinking as driver for innovation in the chemical industry*. *Journal of Business Chemistry* 14(2), 41-50. <http://www.businesschemistry.org/article/?article=247>.

Wageningen University & Research (n.d. a). *Creating value from biomass*. <https://www.wur.nl/Landingspagina-redacteuren-29/en/Research-Results/Research-Institutes/food-biobased-research/Research-themes/Creating-value-from-biomass.htm>. Accessed 7 July 2020.

Wageningen University & Research (n.d. b). *Circular & biobased economy*. <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Themes/theme-biobased-economy.htm>. Accessed 13 December 2020.

Wang, F., Talaue McManus, L. and Xie, R. (eds.) (2019). *Addressing Marine Plastics: A Roadmap to a Circular Economy*. Arendal: United Nations Environment Programme. <https://gefmarineplastics.org/publications/addressing-marine-plastics-a-roadmap-to-a-circular-economy>.

Whitesides, G. (2015). Reinventing Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition* 54(11), 3196-3209. <https://doi.org/10.1002/anie.201410884>.

Woo, B., Kravitz-Wirtz, N., Sass, V., Crowder, K., Teixeira, S. and Takeuchi, D.T. (2019). Residential segregation and racial/ethnic disparities in ambient air pollution. *Race and Social Problems* 11(1), 60-67. <https://doi.org/10.1007/s12552-018-9254-0>.

World Bank Group (2020). *Small and medium enterprises (SMEs) finances: improving SMEs' access to finance and finding innovative solutions to unlock sources of capital*. <https://www.worldbank.org/en/topic/sme/finance>. Accessed 14 December 2020.

World Business Council for Sustainable Development (2018). *Chemical Sector SDG Roadmap*. <https://www.wbcsd.org/Programs/People/Sustainable-Development-Goals/Resources/Chemical-Sector-SDG-Roadmap>.

World Economic Forum (2017). *Digital Transformation Initiative: Chemistry and Advanced Materials Industry*. <http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/dti-chemistry-and-advanced-materials-industry-white-paper.pdf>.

World Economic Forum (2018). *Chemistry and Advanced Materials: Collaborative Innovation towards the Sustainable Development Goals*. Forthcoming. <https://www.weforum.org/>.

World Health Organization (2018a). *The Public Health Impact of Chemicals: Knowns and Unknowns - Data Addendum for 2016*. <http://www.who.int/ipcs/publications/chemicals-public-health-impact/en/>.

World Health Organization (2018b). *Chemicals Road Map: Workbook - Road Map to Enhance Health Sector Engagement in the Strategic Approach to International Chemicals Management towards the 2020 Goal and Beyond*. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/273136/9789241513630-eng.pdf?ua=1>.

World Health Organization (2020). *International Programme on Chemical Safety: WHO chemicals road map and workbook - document links*. <https://www.who.int/ipcs/saicm/roadmap-links/en/>. Accessed 15 December 2020.

Yale University (n.d.). *The global green chemistry initiative*. *Yale Center for Green Chemistry and Green Engineering*. <https://www.global-green-chemistry-initiative.com/>. Accessed 14 December 2020.

Zimmerman, J.B., Anastas, P.T., Erythropel, H.C. and Leitner, W. (2020). Designing for a green chemistry future. *Science* 367(6476), 397-400. <https://doi.org/10.1126/science.aay3060>.

Zimmermann, L., Dombrowski, A., Völker, C. and Wagner, M. (2020). Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? in vitro toxicity and chemical composition. *Environmental International* 145, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106066>.

Zuin, V.G. (2016). Circularity in green chemical products, processes and services: innovative routes based on integrated eco-design and solution systems. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 2, 40-44. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2016.09.008>.

Żukiewicz-Sobczak, W.A. (2013). The role of fungi in allergic diseases. *Postępy Dermatologii i Alergologii* 30(1), 42-45. <https://doi.org/10.5114/pdia.2013.33377>.







# ONU

## programa para el medio ambiente

[science.chemicals@un.org](mailto:science.chemicals@un.org)  
[www.unep.org](http://www.unep.org)

International Environment House I  
Chemin des Anémones 15  
1219 Châtelaine-Geneva

