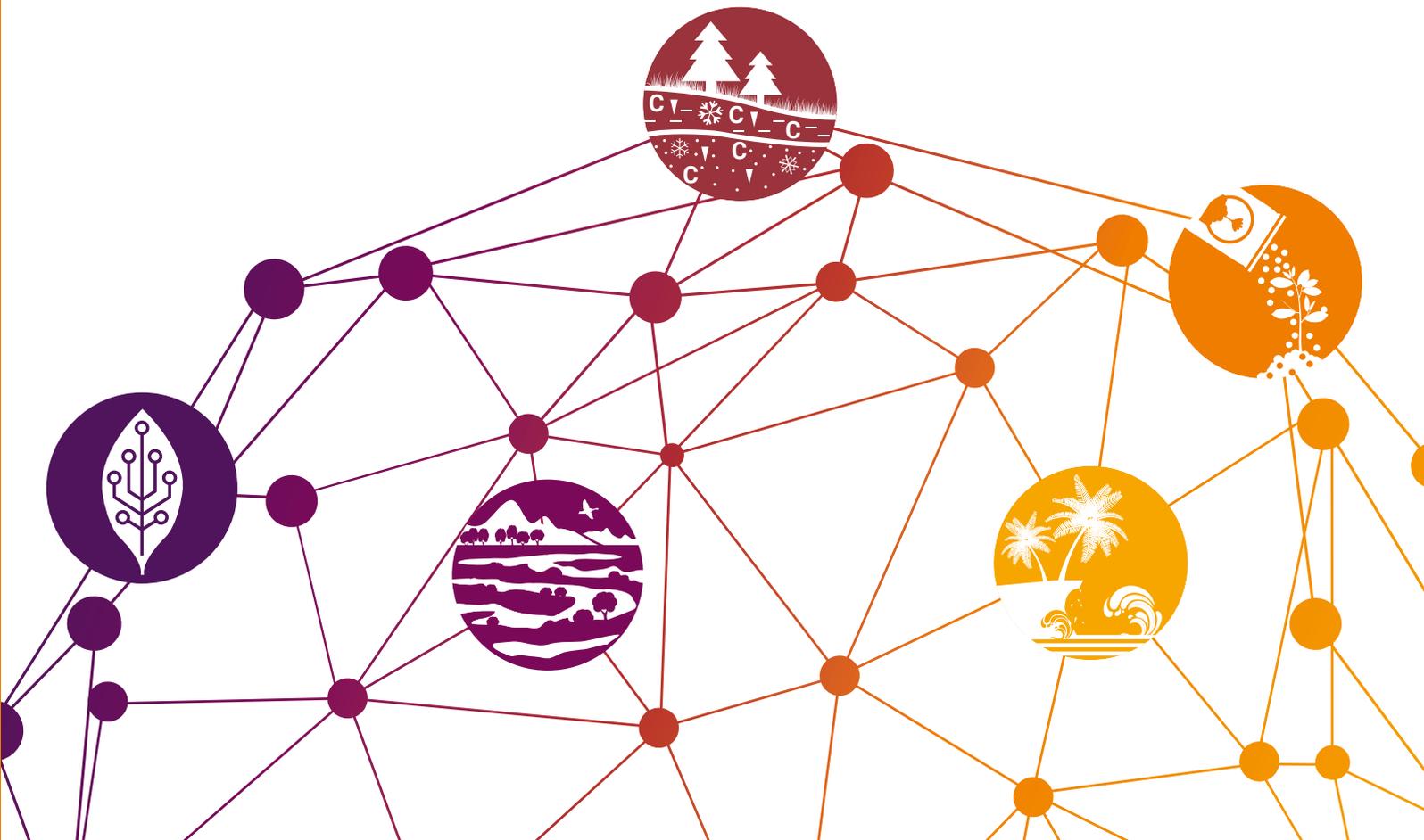


FRONTERAS 2018/19

Nuevos temas de interés ambiental



© 2019 Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ISBN: 978-92-807-3740-0
Núm. de trabajo: DEW/2224/NA

Descargo de responsabilidad

La presente publicación puede reproducirse íntegra o parcialmente y en cualquier formato con fines educativos o sin ánimo de lucro sin el permiso específico del titular de los derechos de autor, siempre y cuando se cite la fuente. ONU Medio Ambiente agradecería recibir una copia de cualquier publicación que emplee este documento como fuente.

No se podrá utilizar la presente publicación para la reventa o con cualquier otro fin comercial sin la obtención previa de un permiso por escrito de ONU Medio Ambiente. Las solicitudes de autorización, acompañadas de una declaración del propósito y la extensión de la reproducción, deben dirigirse a: Director de la División de Comunicaciones de ONU Medio Ambiente, P. O. Box 30552, Nairobi, 00100, Kenya.

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no suponen juicio alguno de ONU Medio Ambiente sobre la condición jurídica de ninguno de los países, territorios o ciudades mencionados o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras. Para obtener indicaciones generales sobre el uso de los mapas contenidos en las publicaciones, visite <https://www.un.org/Depts/Cartographic/english/htmain.htm>.

La mención de una empresa o producto comercial en este documento no implica aprobación por parte de ONU Medio Ambiente. No está permitido el uso de la información de este documento relativa a productos patentados con fines publicitarios.

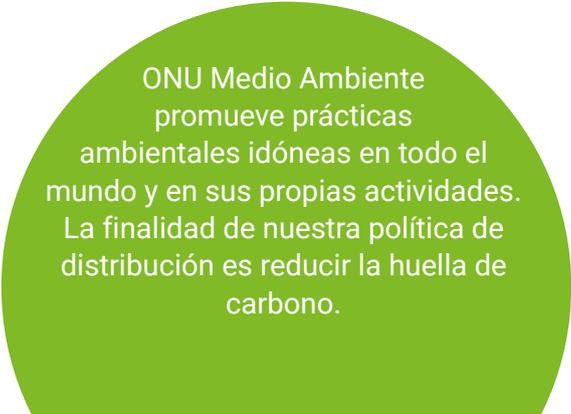
© Mapas, fotografías e ilustraciones según se especifica.

Referencia bibliográfica recomendada

PNUMA (2019). Fronteras 2018/19. Nuevos temas de interés ambiental. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi.

Producción

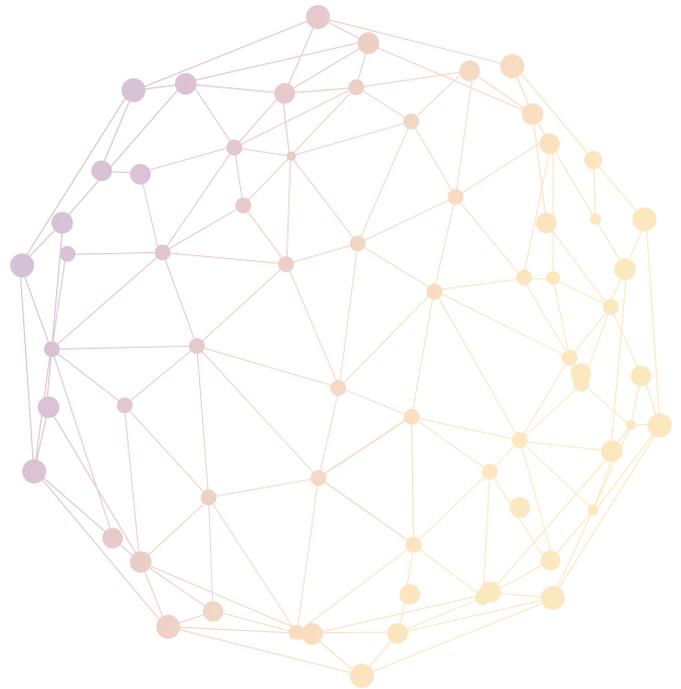
División de Ciencias
ONU Medio Ambiente
P. O. Box 30552
Nairobi, 00100, Kenya
Tel.: (+254) 20 7621234
Correo electrónico: publications@unenvironment.org
Sitio web: www.unenvironment.org/es



ONU Medio Ambiente
promueve prácticas
ambientales idóneas en todo el
mundo y en sus propias actividades.
La finalidad de nuestra política de
distribución es reducir la huella de
carbono.

FRONTERAS 2018/19

Nuevos temas de interés ambiental





Índice

	Prólogo	7
	Agradecimientos	8
	Biología sintética: rediseñar el medio ambiente	10
	Oportunidades y retos	10
	Reescribir el código de la vida	12
	Redefinición de aplicaciones: del laboratorio al ecosistema	16
	Innovar con sensatez	18
	Bibliografía	20
	Conectividad ecológica: un puente para preservar la biodiversidad	24
	Reconexión de ecosistemas fragmentados	24
	Las fuerzas de fragmentación	26
	Promoción de soluciones de conectividad	30
	Fijar metas para la conectividad del futuro	32
	Bibliografía	34
	Turberas del permafrost: pérdida de terreno en un mundo cada vez más cálido	38
	Aceleración del cambio en el Ártico	38
	Deshielo del permafrost, descomposición de las turberas e interacciones complejas	40
	Creciente sensibilización acerca de las turberas del permafrost	44
	Prioridades de conocimiento y ampliación de redes	46
	Bibliografía	48
	La fijación de nitrógeno: de la contaminación por el ciclo del nitrógeno a la economía circular del nitrógeno	52
	El reto mundial del nitrógeno	52
	Qué sabemos y qué sabemos que desconocemos del nitrógeno	54
	Fragmentación de las políticas y soluciones de la economía circular	58
	De cara a un enfoque internacional holístico del nitrógeno	60
	Bibliografía	62
	Inadaptación al cambio climático: evitar las trampas de la senda evolutiva	66
	Definición de la adaptación y la inadaptación al contexto del cambio climático	66
	La inadaptación a escala	68
	Evitar la inadaptación en un futuro limitado por los 1,5 °C	73
	Bibliografía	74



Prólogo



En la primera década del siglo xx, los químicos alemanes Fritz Haber y Carl Bosch desarrollaron un método para producir nitrógeno sintético barato a mayor escala. Su invento estimuló la producción masiva de fertilizantes nitrogenados, que transformó la agricultura mundial y también marcó el inicio de nuestra prolongada intromisión en el balance de nitrógeno de la Tierra. Se calcula que todos los años se pierden en el medio ambiente unos 200.000 millones de dólares de los Estados Unidos de nitrógeno reactivo, el cual degrada nuestros suelos, contamina nuestro aire y provoca la propagación de «zonas muertas» y floraciones tóxicas de algas en nuestros cursos de agua.

No resulta sorprendente que muchos científicos sostengan que la era geológica actual debería denominarse oficialmente «el Antropoceno». En tan solo unos decenios, la humanidad ha provocado que las temperaturas mundiales aumenten a un ritmo 170 veces superior al natural. También hemos modificado deliberadamente más del 75% de la superficie terrestre del planeta y alterado de forma permanente el caudal de más del 93% de los ríos del mundo. No solo estamos causando cambios radicales en la biosfera; ahora también somos capaces de reescribir —e incluso crear de la nada— nada menos que los componentes fundamentales de la vida.

Año tras año, una red de científicos, expertos e instituciones de todo el mundo colaboran con ONU Medio Ambiente en el descubrimiento y el análisis de nuevos temas que tendrán efectos profundos en la sociedad, la economía y el medio ambiente. Algunas de esas cuestiones están relacionadas con tecnologías novedosas que tienen aplicaciones asombrosas y riesgos inciertos, mientras que otras son perennes, como la fragmentación de los paisajes silvestres y el deshielo de suelos que llevan mucho tiempo congelados. Otro de esos temas —la contaminación por nitrógeno— es la consecuencia imprevista de decenios de actividad humana en la biosfera. En el último de los temas analizados, la inadaptación al cambio climático, se destaca que no hemos sabido adaptarnos de manera apropiada al mundo cambiante en el que vivimos.

También hay buenas noticias. Como podrá apreciar en las páginas siguientes, está comenzando a surgir un enfoque holístico para hacer frente al reto mundial de la gestión del nitrógeno. En China, la India y la Unión Europea se observan nuevas iniciativas prometedoras dirigidas a reducir las pérdidas y mejorar la eficiencia de los abonos nitrogenados. En última instancia, la recuperación y el reciclaje del nitrógeno y de otros nutrientes y materiales valiosos pueden ayudarnos a cultivar de forma limpia y sostenible, sello distintivo de una economía verdaderamente circular.

Las cuestiones analizadas en *Fronteras* deberían servir para recordarnos que, cada vez que interferimos con la naturaleza —ya sea a escala mundial o a nivel molecular—, nos arriesgamos a generar efectos de larga duración en nuestro hogar: el planeta. No obstante, si actuamos con previsión y trabajamos juntos, podemos anticiparnos a estas cuestiones y concebir soluciones útiles para todos, incluidas las generaciones posteriores.

Joyce Msuya
Directora Ejecutiva Interina
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

Agradecimientos

Biología sintética: rediseñar el medio ambiente

Autores principales

Bartłomiej Kolodziejczyk, H2SG Energy Pte. Ltd. Singapur
Natalie Kofler, Instituto Yale de Estudios Biosféricos, Connecticut (Estados Unidos)

Colaboradores y revisores

Marianela Araya, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Montreal (Canadá)
James Bull, Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Texas en Austin, Texas (Estados Unidos)
Jackson Chamber, Departamento de Estadística Biológica y Biología Computacional de la Universidad de Cornell, Nueva York (Estados Unidos)
Chen Liu, Departamento de Estadística Biológica y Biología Computacional de la Universidad de Cornell, Nueva York (Estados Unidos)
Yongyuth Yuthavong, Organismo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Tailandia, Pathumthani (Tailandia)

Conectividad ecológica: un puente para preservar la biodiversidad

Autor principal

Gary Tabor, Centro de Conservación del Paisaje a Gran Escala, Montana (Estados Unidos)

Colaboradores y revisores

Maya Bankova-Todorova, Fondo Mohamed bin Zayed para la Conservación de las Especies, Abu Dabi (Emiratos Árabes Unidos)
Camilo Andrés Correa Ayram, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá (Colombia)
Letícia Couto Garcia, Universidad Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande (Brasil)
Valerie Kapos, Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación de ONU Medio Ambiente, Cambridge (Reino Unido)
Andrew Olds, Escuela de Ciencia e Ingeniería de la Universidad de Sunshine Coast, Maroochydore (Australia)
Ileana Stupariu, Facultad de Geografía de la Universidad de Bucarest (Rumania)

Turberas del permafrost: pérdida de terreno en un mundo cada vez más cálido

Autor principal

Hans Joosten, Universidad de Greifswald/Greifswald Mire Centre, Greifswald (Alemania)

Colaboradores y revisores

Dianna Kopansky, ONU Medio Ambiente, Nairobi (Kenya)
David Olefeldt, Facultad de Ciencias Agrícolas, Biológicas y Ambientales, Universidad de Alberta, Edmonton (Canadá)
Dmitry Streletskiy, Departamento de Geografía de la Universidad George Washington, Washington D. C. (Estados Unidos)

La fijación de nitrógeno: de la contaminación por el ciclo del nitrógeno a la economía circular del nitrógeno

Autores principales

Mark Sutton, Centro de Ecología e Hidrología, Edimburgo (Reino Unido)
Nandula Raghuram, Universidad Guru Gobind Singh Indraprastha, Nueva Delhi (India)
Tapan Kumar Adhya, Instituto Kalinga de Tecnología Industrial, Bhubaneswar, Odisha (India)

Colaboradores y revisores

Jill Baron, Servicio Geológico de los Estados Unidos, Colorado (Estados Unidos)
Christopher Cox, ONU Medio Ambiente, Nairobi (Kenya)
Wim de Vries, Universidad y Centro de Investigación de Wageningen, Wageningen (Países Bajos)
Kevin Hicks, Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo, York (Reino Unido)
Clare Howard, Centro de Ecología e Hidrología, Edimburgo (Reino Unido)
Xiaotang Ju, Facultad de Recursos Agrícolas y Ciencias Ambientales de la Universidad Agrícola de China, Beijing (China)
David Kanter, Facultad de Arte y Ciencia de la Universidad de Nueva York, Nueva York (Estados Unidos)
Cargele Masso, Instituto Internacional de Agricultura Tropical, Ibadan (Nigeria)

Jean Pierre Ometto, Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales, São José dos Campos (Brasil)
Ramesh Ramachandran, Centro Nacional para la Gestión Sostenible de las Zonas Costeras, Ministerio de Medio Ambiente, Silvicultura y Cambio Climático, Chennai (India)
Hans Van Grinsven, Agencia de Evaluación del Medio Ambiente de los Países Bajos (PBL), La Haya (Países Bajos)
Wilfried Winiwarter, Instituto Internacional de Análisis Aplicados de Sistemas, Laxenburg (Austria)

Inadaptación al cambio climático: evitar las trampas de la senda evolutiva

Autor principal

Catherine McMullen, Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo, Bangkok (Tailandia)

Colaboradores y revisores

Thomas Downing, Alianza Mundial de Adaptación al Clima, Oxford (Reino Unido)
Anthony Patt, Instituto de Decisiones Ambientales, Instituto Federal Suizo de Tecnología, Zúrich (Suiza)
Bernadette Resurrección, Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo, Bangkok (Tailandia)
Jessica Troni, ONU Medio Ambiente, Nairobi (Kenya)

También deseamos transmitir nuestro profundo agradecimiento a:

Alexandra Barthelmes y Cosima Tegetmeyer, Instituto de Botánica y Ecología del Paisaje, Greifswald (Alemania); Marin Klinger, Centro Nacional de Datos sobre Nieve y Hielos, Colorado (Estados Unidos); Judith Akoth, Salome Chamanje, David Cole, Nicolien Delange, Angeline Djampou, Philip Drost, Virginia Gitari, Jian Liu, Ariana Magini, Nada Matta, Pauline Mugo, Susan Mutebi-Richards, Shari Nijman, Andreas Obrecht, Samuel Opiyo, Moses Osani, Rajinder Sian, Roxanna Samii, Nandita Surendran y Josephine Wambua, ONU Medio Ambiente.

Asesores de producción

Maarten Kappelle y Edoardo Zandri, ONU Medio Ambiente, Nairobi (Kenya)

Equipo de producción

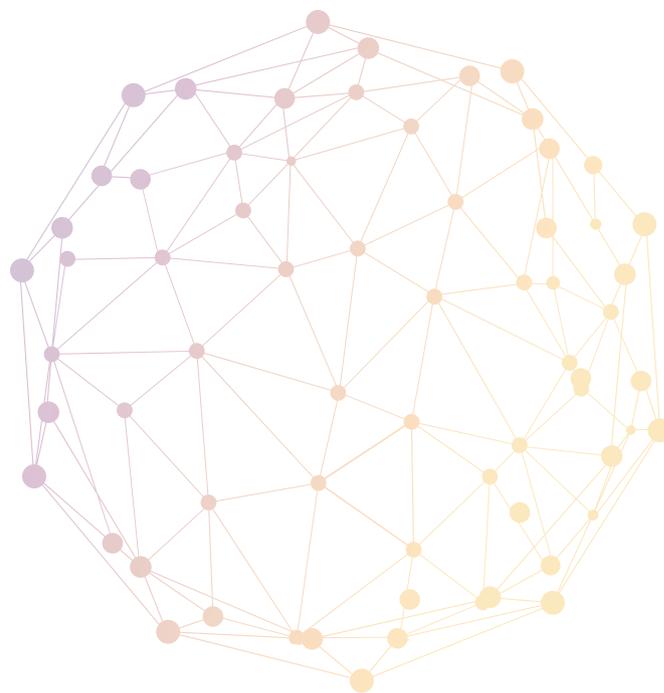
Redactora jefa: Pinya Sarasas, ONU Medio Ambiente
Asistencia técnica: Allan Lelei, ONU Medio Ambiente
Correctora: Alexandra Horton, Reino Unido

Gráficos, diseño y maquetación

Diseño gráfico: Audrey Ringler, ONU Medio Ambiente
Cartografía: Jane Muriithi, ONU Medio Ambiente

Impresión

ONUN, Departamento de Servicios de Publicación, Nairobi, con certificación ISO 14001:2004





Fotografía: oticki / Shutterstock.com

La fijación de nitrógeno: de la contaminación por el ciclo del nitrógeno a la economía circular del nitrógeno

El reto mundial del nitrógeno

En el *Anuario del PNUMA 2014* se subraya la importancia del exceso de nitrógeno reactivo en el medio ambiente¹. Las conclusiones de dicho informe son alarmantes, no solo por la magnitud y complejidad de la contaminación por nitrógeno, sino también por los escasos progresos que se han hecho de cara a reducirla. Pocas de las soluciones señaladas se han ampliado; entretanto, el mundo sigue bombeando un nitrógeno que contribuye de forma notable a la disminución de la calidad del aire, el deterioro de los entornos terrestres y acuáticos, la exacerbación del cambio climático y la disminución de la capa de ozono²⁻¹⁰. Estos efectos obstaculizan los avances hacia la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, pues afectan a la salud humana, la gestión de recursos, los medios de vida y las economías¹¹⁻¹⁵. Sin embargo, hay motivos para la esperanza. En los últimos cuatro años se han transformado los enfoques de gestión de la contaminación por nitrógeno, por

ejemplo, con nuevas ideas sobre el consumo y la producción encaminadas a afrontar con seriedad el problema del nitrógeno¹⁶⁻²⁴.

El nitrógeno es un elemento extremadamente abundante en la atmósfera de la Tierra. Como molécula N_2 , el nitrógeno es inocuo; de hecho, representa el 78% del aire que respiramos. Los dos átomos de nitrógeno se mantienen unidos gracias a un triple enlace muy sólido ($N\equiv N$) que los hace sumamente estables y químicamente no reactivos. El planeta sale beneficiado, pues el N_2 posibilita la existencia de una atmósfera segura en la que la vida puede prosperar y, al mismo tiempo, se evitan las consecuencias inflamables de un exceso de oxígeno. El interés ambiental del nitrógeno tiene que ver con la conversión del N_2 en otras formas químicamente reactivas. En aras de la sencillez, los científicos se refieren a todas las demás formas del nitrógeno como «nitrógeno fijado» o «reactivo» (N_r)^{11,25}. Existen numerosos tipos de N_r con muchos efectos diferentes —tanto beneficiosos como nocivos—, y ahí es donde surgen las complicaciones.

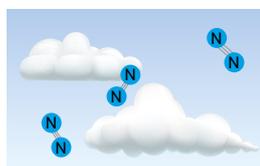
El nitrógeno reactivo es esencial para toda la vida en la Tierra. El amoníaco (NH_3), por ejemplo, es la base de los aminoácidos, las proteínas, las enzimas y el ADN, de modo que es un elemento fundamental en el metabolismo de todas las formas de vida. De igual modo, el óxido nítrico (NO) actúa como compuesto biológico señalizador clave, mientras que el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-) son las principales formas de nutrientes de nitrógeno, imprescindibles para el crecimiento de las plantas. Se observa, por tanto, uno de los principales beneficios que reportan los compuestos de N_r : su contribución a la producción de alimentos y piensos. Por medio del proceso de Haber-Bosch de «fijación» artificial de nitrógeno, el ser humano ha aumentado enormemente la producción de fertilizantes —amoníaco, urea y nitratos— para sostener el crecimiento de la población mundial²⁶. Paralelamente, la humanidad se beneficia de la fijación biológica natural del N_2 en N_r , que llevan a cabo bacterias especializadas que se encuentran en el suelo y guardan relación con las raíces de los cultivos de legumbres.

A esos beneficios se contraponen las numerosas fugas de amoníaco, nitrato, óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) y muchas otras formas de contaminación por N_r , que provocan múltiples

efectos en el medio ambiente. Esas fugas pueden producirse de forma directa a raíz del uso de fertilizantes; asimismo, el estiércol, los excrementos humanos y otros desechos orgánicos causan enormes pérdidas de N_r en el medio ambiente. Aunque se cree que el porcentaje de N_r que llega al medio ambiente procedente de la fijación biológica del nitrógeno es menor que el causado por el uso de muchos fertilizantes, los excrementos de animales y seres humanos también contribuyen a la contaminación por nitrógeno.

El nitrógeno reactivo también es un subproducto de ciertas actividades humanas. Por ejemplo, en los procesos de combustión de biomasa y combustibles fósiles se liberan NO y NO_2 , que colectivamente se denominan NO_x . Pese a las importantes iniciativas acometidas con ánimo de reducir el NO_x de los vehículos y la generación de energía, las emisiones siguen aumentando en zonas del mundo que se desarrollan con rapidez^{6,12}. En conjunto, los seres humanos están produciendo una combinación de nitrógeno reactivo que pone en peligro la salud, el clima y los ecosistemas, lo que convierte al nitrógeno en uno de los problemas de contaminación más importantes a los que se enfrenta la humanidad. A pesar de ello, la escala del problema todavía se desconoce en gran medida y no se reconoce fuera de los círculos científicos.

Las distintas formas del nitrógeno en el medio ambiente



Dinitrógeno (N_2)

Fuente

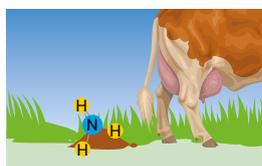
El N_2 constituye el 78% del aire que respiramos.

Beneficios

El N_2 mantiene una atmósfera estable para la vida en la Tierra. El tono azul del cielo se debe a él.

Efectos

El N_2 es inocuo y químicamente no reactivo.



Amoníaco (NH_3)

Fuente

Estiércol, orina, fertilizantes y quema de biomasa.

Beneficios

El NH_3 es la base de los aminoácidos, las proteínas y las enzimas. El amoníaco suele emplearse como fertilizante.

Efectos

El NH_3 provoca eutrofización y afecta a la biodiversidad. Forma materia particulada en el aire perjudicial para la salud.



Óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2)

Fuente

Combustión de los sectores del transporte, la industria y la energía. El NO y el NO_2 se denominan colectivamente NO_x .

Beneficios

El NO es esencial en la fisiología humana. No se conocen beneficios del NO_2 .

Efectos

El NO y el NO_2 (o NO_x) son importantes contaminantes atmosféricos que provocan cardiopatías y enfermedades respiratorias.



Nitrato (NO_3^-)

Fuente

Aguas residuales, agricultura y oxidación del NO_x .

Beneficios

Se utiliza ampliamente en fertilizantes y explosivos.

Efectos

Forma materia particulada en el aire perjudicial para la salud. En el agua provoca eutrofización.



Óxido nitroso (N_2O)

Fuente

Agricultura, industria y combustión.

Beneficios

Se usa para propulsar cohetes y en las intervenciones médicas como gas hilarante.

Efectos

El N_2O es un gas de efecto invernadero 300 veces más potente que el CO_2 . También provoca la disminución del ozono estratosférico.

Qué sabemos y qué sabemos que desconocemos del nitrógeno

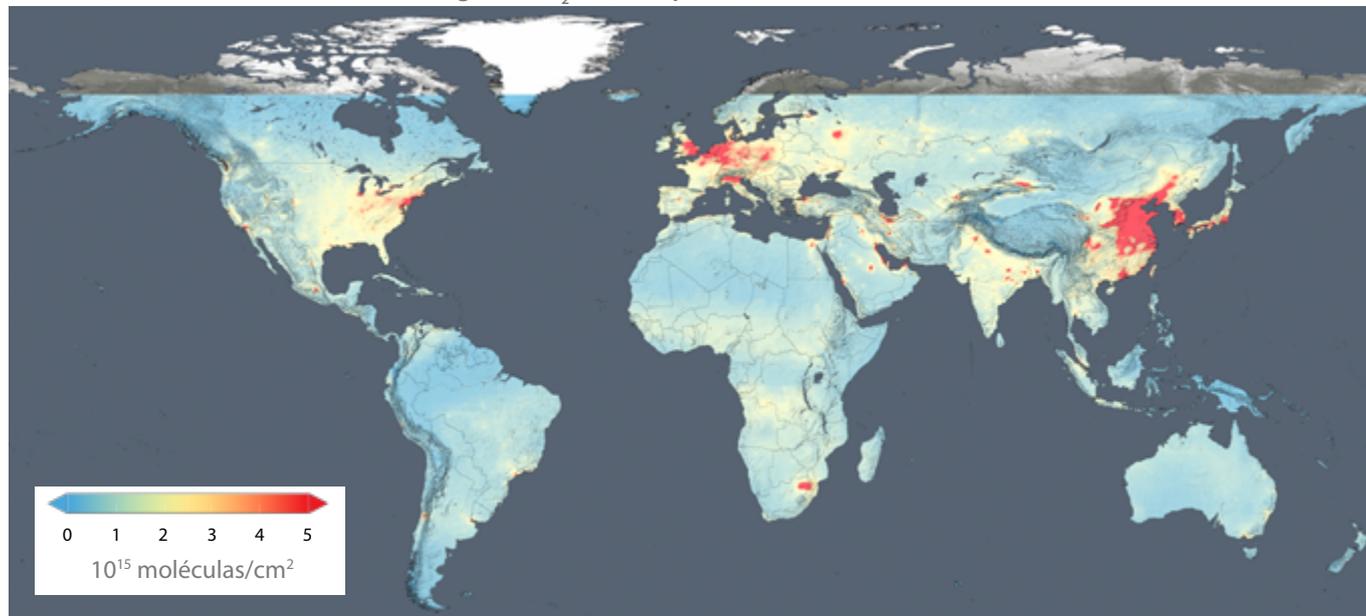
Tanto el ciclo de los compuestos nitrogenados como sus efectos en el ser humano están bien documentados^{4,12,27,28}. Sin embargo, en comparación con el rol del carbono en el cambio climático, apenas se ha generado debate público sobre la necesidad de tomar medidas en relación con el nitrógeno. Es posible medir el incremento de los niveles de compuestos de N_r en la atmósfera sobre las ciudades y las zonas agrícolas, por ejemplo, como NO_x , NH_3 y materia particulada fina o $PM_{2.5}$. Del mismo modo, es posible cuantificar los niveles elevados de NO_3^- en las aguas subterráneas situadas bajo las zonas agrícolas de varias regiones del mundo, así como en los cauces fluviales de bajada en ciudades donde apenas se tratan las aguas residuales, o no se tratan en absoluto. La concentración atmosférica del gas de efecto invernadero N_2O aumenta a un ritmo cada vez mayor. La conclusión evidente es que el ser humano está alterando profundamente el ciclo global del nitrógeno, lo que provoca múltiples formas de contaminación y consecuencias y hace del N_r un contaminante clave que hay que combatir a escala local y mundial²².

En la Evaluación Europea del Nitrógeno se detectaron cinco amenazas principales derivadas de la contaminación por

compuestos nitrogenados: la calidad del agua, la calidad del aire, el equilibrio de los gases de efecto invernadero, los ecosistemas y la biodiversidad, y la calidad del suelo⁴. Se puso de manifiesto que la contaminación por nitrógeno no es en sí misma un problema nuevo, sino que su gestión debe inscribirse en la búsqueda de una solución a los numerosos problemas ambientales que existen. En relación con la producción de alimentos, el uso mundial del nitrógeno es sumamente ineficiente^{20,29}. Considerando toda la cadena alimentaria, solo alrededor del 20% del N_r que se aporta a los cultivos acaba en los alimentos para consumo humano^{11,17}. Por tanto, nada menos que el 80% se desperdicia en forma de contaminación y N_2 , lo que demuestra que la contaminación por N_r representa una pérdida enorme de recursos muy valiosos.

Aunque en el pasado las iniciativas se centraron en un enfoque fragmentado entre las diversas formas de N_r , considerar a todas conjuntamente reporta varias ventajas. En primer lugar, nos permite empezar a analizar las sinergias y contrapartidas entre los beneficios del N_r y los diferentes tipos de contaminación por N_r . En segundo lugar, igualmente importante, nos anima a cuantificar el costo social de todos los efectos de la contaminación por nitrógeno para fundamentar las políticas e informar a la opinión pública^{13,30}. Las estimaciones de costos pueden orientar las políticas de mitigación, pese a que en realidad somos conscientes

Concentración media de dióxido de nitrógeno (NO_2) en la troposfera en 2014



El NO_2 es un gas que emiten principalmente los vehículos, las centrales eléctricas y la actividad industrial. El NO_2 y otros NO_x reaccionan al entrar en contacto con otros contaminantes atmosféricos con los que forman ozono troposférico, lluvia ácida y materia particulada.

Fotografía: Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA



Vídeo: Salvar los Grandes Lagos de las algas tóxicas



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=b6JzL4NG26k>

© PBS NewsHour

Fotografía: Floración de algas en Pelee Island, en la parte sudoriental del lago Erie
Fotografía: Tom Archer / Michigan Sea Grant (www.miseagrant.umich.edu)

de que desconocemos el costo real de la contaminación por nitrógeno, pues sus consecuencias fundamentalmente no son conmensurables, es decir, resulta difícil dar con una medida común. En cualquier caso, las estimaciones disponibles, basadas en la disposición de las personas a reducir los riesgos de la contaminación por N_r , o las estimaciones de los costos para los ecosistemas y los servicios de salud, resultan ilustrativas e indican un costo anual mundial de aproximadamente entre 340.000 millones y 3,4 billones de dólares de los Estados Unidos¹¹.

No obstante, quizá resulte más revelador hacer un cálculo mucho más sencillo. En el mundo, cada año se desperdician o pierden en el medio ambiente unos 200 millones de toneladas de recursos de N_r , ya sea como N_r o N_2 ^{11,28}. Si multiplicamos esa cifra por el precio nominal de un fertilizante de 1 dólar por kilogramo de N , obtenemos una pérdida de efectivo de aproximadamente 200.000 millones de dólares de los Estados Unidos anuales. Se trata, sin duda, de un estímulo importante para tomar medidas. Este mensaje también resulta pertinente para las zonas con insuficiente N_r , como África Subsahariana, donde reducir la contaminación por N_r ayudaría a que las escasas fuentes disponibles de N_r impulsaran en mayor medida la producción de alimentos³¹. La reconversión de compuestos de N_r en N_2 (lo que se conoce como «desnitrificación») no constituye un modo seguro de evitar la contaminación por N_r ; más bien conlleva la necesidad de nuevas aportaciones de N_r . Es evidente que para aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno para el conjunto de la economía hay que reducir las pérdidas de N_2 y N_r .



Floración de algas (en un tono verde apagado) al oeste del lago Erie, entre el Canadá y los Estados Unidos, el 3 de agosto de 2014. La frecuente floración de las algas del lago Erie se debe a la carga de nitrógeno y fósforo procedente de la escorrentía de fertilizantes y estiércol de tierras agrícolas, a los efluentes de aguas residuales municipales y a la aportación de contaminantes atmosféricos.

Fotografía: Jeff Schmaltz / Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA



Vídeo: La huella humana en la calidad del aire mundial



Enlace: https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=aMnDoXuTGS4

© Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA

Fotografía: Doin / Shutterstock.com

Consumo de combustibles fósiles en los sectores del transporte, la energía y la industria

La combustión a altas temperaturas de carbono, petróleo y gas natural libera una gran cantidad de N_r en forma de NO y NO_2 , lo que se conoce colectivamente como NO_x

El sector del **transporte** contribuye a más del **65%** de las emisiones de NO_x

El consumo de combustibles fósiles es responsable del **13%** de la fijación antropógena del N_2 en N_r



Producción de fertilizantes

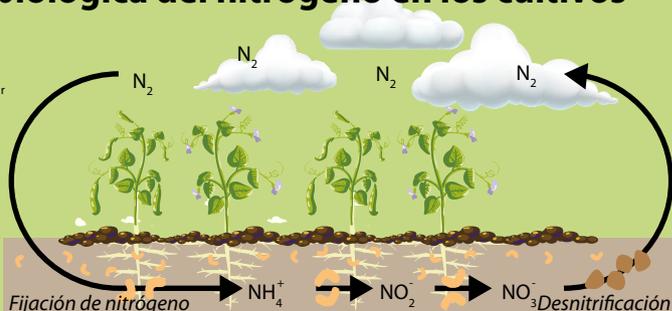
El proceso de Haber-Bosch se inventó hace más de 100 años para satisfacer la creciente demanda de producción industrial de fertilizantes de N_r y explosivos nitrogenados. Del mismo modo que la fijación natural de nitrógeno por acción de las bacterias, **este proceso convierte el N_2 atmosférico en amoníaco (NH_3)**.



La **producción de fertilizantes** es responsable del **63%** de la fijación antropógena de N_2 en N_r

Fijación biológica del nitrógeno en los cultivos

En la naturaleza, el N_2 puede convertirse en N_r debido a los relámpagos y a la fijación biológica del nitrógeno por acción de bacterias fijadoras de nitrógeno

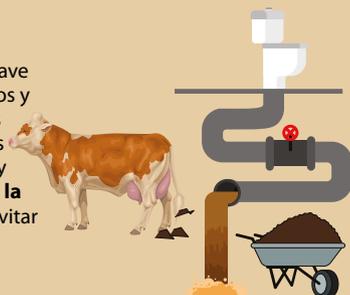


El N_r también puede reconvertirse en N_2 mediante un **proceso biológico de desnitrificación** que realizan las bacterias anaerobias. Estos procesos naturales mantienen el equilibrio del ciclo de nitrógeno; sin embargo, el incremento de los **cultivos fijadores de nitrógeno**, como las legumbres, ha disparado las aportaciones y pérdidas de N_r en el medio ambiente.

La **fijación biológica del nitrógeno en la producción de cultivos** es responsable del **24%** de la conversión de N_2 en N_r

Desechos

Además de la importancia clave de la producción de alimentos y el consumo de combustibles fósiles en la mitigación de las emisiones de N_r , también hay que señalar la **relevancia de la gestión de desechos** para evitar que llegue más N_r al medio ambiente



Las **aguas residuales** y los **desechos alimentarios** contienen proteínas. En torno al **16%** de la **proteína es nitrógeno**

Al contrario de lo que sucede con las aguas residuales, sí **es posible evitar** una gran parte de los desechos alimentarios



Los mayores volúmenes de pérdidas y desechos de alimentos corresponden a los **cereales**, la **fruta**, la **verdura**, las **raíces** y los **tubérculos**

Cada año se **pierde o desecha** aproximadamente una **tercera parte de los alimentos que se producen** en el mundo para consumo humano

The Nitrogen Cascade

El 78% del aire es N_2

El óxido **nitroso** (N_2O) es un **gas de efecto invernadero** 300 veces más potente que el CO_2 y daña la capa de ozono

Casi el **80%** de las emisiones antropogénicas de N_2O provienen de la agricultura

El **80%** de las emisiones mundiales de **amoníaco** (NH_3) tienen su origen en actividades humanas, principalmente en la **aplicación de fertilizantes** y en la **cría de animales**

El amoníaco y el ácido nítrico reaccionan y forman **materia particulada** de nitrato de amonio, que conlleva riesgo de enfermedades respiratorias y cardiopatías

Las emisiones de N_2 pueden combinarse con la lluvia, lo que da pie a la **lluvia de ácido nítrico**.

El **50%** de los abonos nitrogenados que se añaden a los campos agrícolas se convierten en **contaminación** o se desperdician mediante su **desnitrificación** y reconversión a N_2

El **nitrato** (NO_3^-) de la actividad agrícola puede filtrarse en el suelo hasta la **capa freática** y afectar a la calidad de los suministros de **agua potable**, con los consiguientes riesgos significativos para la **salud humana**

La fertilización con N favorece la **eutrofización** que da pie a **floraciones de algas perjudiciales, espacios muertos y pérdida de biodiversidad** en los entornos de agua dulce y marinos

A largo plazo, la aplicación de fertilizantes a base de amonio provoca la **acidificación del suelo**, lo que afecta a la producción de cultivos

La contaminación por amoníaco provoca eutrofización, acidificación del suelo y toxicidad directa en los organismos, de modo que **reduce la profusión y diversidad de especies**

Los **óxidos de nitrógeno** (NO_x) afectan a la calidad del aire de las ciudades. La exposición aguda y crónica al NO_2 se asocia a **enfermedades respiratorias y cardiovasculares** y muertes a causa de estas. Los niños, los ancianos y las personas asmáticas son vulnerables al NO_2

En 2016, en el mundo se utilizaron **105 millones de toneladas métricas** de abono nitrogenado, el equivalente a **4,2 millones de camiones** cargados de fertilizantes



Fragmentación de las políticas y soluciones de la economía circular

Al igual que los conocimientos científicos sobre el nitrógeno se han fragmentado en compartimentos ambientales y formas de N, lo mismo puede decirse de las políticas relativas al nitrógeno. Los efectos del N_r se hacen notar en diversos ámbitos de políticas, tales como la contaminación atmosférica, el clima, los medios de agua dulce y marinos, la biodiversidad, la salud y la seguridad alimentaria. Esta fragmentación, que se observa de forma generalizada en las políticas de numerosos países, resulta igualmente patente en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Al analizar los ODS y sus indicadores subyacentes se aprecia que el nitrógeno, pertinente en relación con casi todos ellos, es también invisible. El indicador propuesto para el ODS 14.1 referente a la vida acuática es el único indicador que guarda relación con el nitrógeno que se está aplicando en este momento³². Las propuestas para incluir la eficiencia en el uso del nitrógeno o las pérdidas de nitrógeno en el conjunto de indicadores de los ODS todavía no se han aprobado^{20,33}.

Las consecuencias de esta fragmentación de las políticas sobre el ciclo del nitrógeno se hacen patentes en las compensaciones entre políticas. Por ejemplo, las políticas encaminadas a reducir la contaminación del agua por NO₃⁻ en la Unión Europea llevaron a prohibir la aplicación de estiércol en la tierra en determinados «períodos de veda» invernales. Sin embargo, esa medida hizo que se intensificara la aplicación de estiércol en la primavera y el verano, lo que a su vez provocó un incremento del nivel máximo de las concentraciones de amoníaco en la atmósfera³⁴. Este efecto temporal solo se evitó, de manera parcial, en un número reducido de países de la Unión Europea que obligaron a aplicar estiércol con bajas emisiones de NH₃³⁵. Hallamos otro ejemplo en la recomendación de estabular el ganado para reducir las emisiones de N₂O pertinentes para el clima. En cualquier caso, aun cuando se aplicaran las mejores medidas técnicas para moderar las emisiones, esta decisión daría pie, en términos generales, a mayores emisiones de NH₃³⁶. Este tipo de compensaciones también resultan pertinentes al hablar de las fuentes de combustión. Por ejemplo, la introducción en la década de 1990 de catalizadores para reducir las emisiones de NOx propició un aumento de las emisiones de N₂O y NH₃.

Estos ejemplos demuestran que es urgentemente necesario combinar los conocimientos científicos y las políticas sobre el nitrógeno para hacer frente a múltiples amenazas^{11,30,37}. Por ejemplo, el plan de acción del Gobierno de China para evitar el incremento del uso de fertilizantes, de 2015, se propone impedir el auge del uso de fertilizantes sintéticos antes de 2020 sin reducir



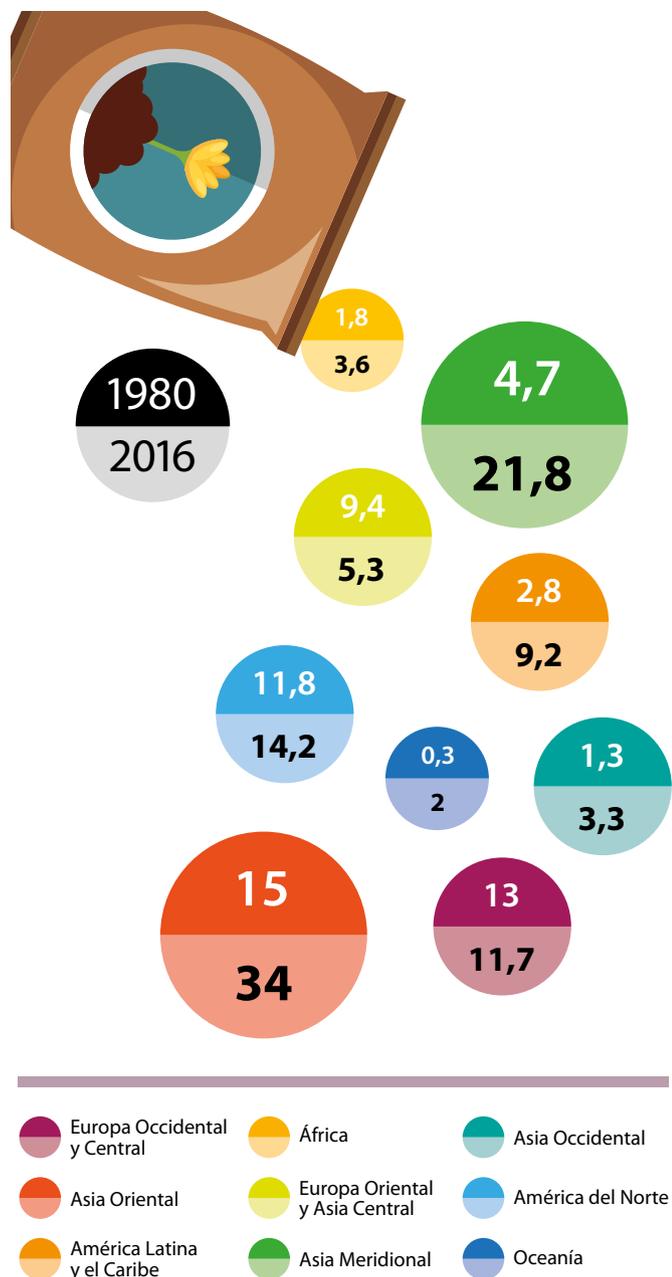
El nitrógeno, los nutrientes y la economía circular

El paquete sobre la economía circular aprobado por la Unión Europea en 2015 tiene el propósito de maximizar la eficiencia en el uso de los recursos en todas las etapas de la cadena de valor —producción, consumo, gestión de derechos y reciclaje de las materias primas de recuperación—^{42,43}. En el plan se reconocen la gestión y el comercio de fertilizantes orgánicos y a partir de desechos como elementos clave para la recuperación y el reciclaje en la economía de la Unión Europea de bionutrientes como el nitrógeno y el fósforo. La nueva regulación alienta la producción sostenible e innovadora de fertilizantes orgánicos con los biorresiduos disponibles en los países, subproductos de los animales como el estiércol seco o digerido y otros residuos agrícolas. En la actualidad, solo el 5% de los desechos orgánicos se reciclan y aplican como fertilizantes en la Unión Europea. Posibilitar la libre circulación entre países de los fertilizantes biológicos propiciaría la creación de un espacio comercial y una cadena de suministro nuevos para las materias primas de recuperación en el territorio de la Unión Europea. Se calcula que con esta medida se crearían unos 120.000 empleos. Se espera que la recuperación del nitrógeno de los biorresiduos reduzca o elimine la necesidad de utilizar abonos nitrogenados sintéticos o inorgánicos, cuya producción tiene una profunda huella de carbono y energética. Al mismo tiempo, ayudaría a reducir las pérdidas de nitrógeno reactivo en el medio ambiente.

La movilización de la economía circular del nitrógeno y otros nutrientes comienza en las explotaciones agrícolas, donde la reducción de esas pérdidas hace posible una aportación más eficaz de nutrientes que favorecen el crecimiento de los cultivos. En ese sentido, es muy necesario facilitar herramientas prácticas que orienten a los agricultores sobre cómo pueden reducir las aportaciones de nitrógeno gracias a la disminución de las pérdidas contaminantes de nitrógeno que se obtiene al aplicar los métodos de mitigación. Esas herramientas deben respaldarse con análisis adecuados del suelo que den seguridad a los agricultores a la hora de reajustar las aportaciones de nutrientes.

Asimismo, existe un enorme margen para ampliar la reutilización del nitrógeno y otros nutrientes con miras a producir productos comercializables con valor añadido. Del mismo modo en que las grandes inversiones están transformando la sociedad en aras de una «economía baja en carbono» (por ejemplo, con las fuentes de energía renovables), el valor del nitrógeno representa una importante oportunidad económica para invertir en favor de una «economía circular del nitrógeno».

Consumo regional de todos los tipos de abonos nitrogenados en 1980 y 2016 (en millones de toneladas métricas)



Fuente de los datos: Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (<https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>)

la producción de alimentos, con lo que se limitarían todas las formas de contaminación por N_r . Se ha sugerido que el próximo paso debería poner el énfasis en las barreras socioeconómicas relacionadas con las dimensiones de las explotaciones agrícolas, la innovación y la transferencia de información³⁸.

También es fácil imaginar la transformación del ciclo del nitrógeno en la agricultura en un modelo de economía circular del nitrógeno. En ese caso, al mejorarse la eficiencia y reducirse las pérdidas de los fertilizantes, la fijación biológica del nitrógeno, la orina y el estiércol se permitiría que el nuevo nitrógeno llegara a los productos alimentarios y bioenergéticos previstos. Al mismo tiempo, el reprocesamiento de los excrementos de animales y seres humanos para convertirlos en nuevos fertilizantes ofrece la oportunidad de comercializar productos fertilizantes reciclados.

La situación ha sido muy distinta en lo que respecta a las fuentes de combustión de NO_x , pues todas las tecnologías disponibles —por ejemplo, las de reducción catalítica y no catalítica— se centran en la desnitrificación del NO_x para reconvertirlo en N_2 . No obstante, ello conlleva una pérdida enorme de recursos. Al multiplicar las emisiones mundiales de NO_x por el precio de los fertilizantes de N_r obtenemos la cifra de 50.000 millones de dólares de los Estados Unidos anuales, de lo que se deduce que se requieren tecnologías capaces de recapturar el NO_x como $NO_3^{-11,39}$.

En la India, la perspectiva financiera también fundamenta una política gubernamental que desde 2016 exige que todos los fertilizantes de urea se revistan con aceite de margosa a fin de reducir las pérdidas de N_r en el medio ambiente y las pérdidas económicas que suponen las subvenciones a las aplicaciones de urea con fines distintos del agrícola. En ese mismo principio se basa el llamamiento efectuado por el Primer Ministro de la India en noviembre de 2017 a que todos los agricultores reduzcan a la mitad el uso de fertilizantes para 2020, así como el respaldo gubernamental a la Agricultura Natural de Presupuesto Cero (ANPC) en varios estados del país. El movimiento de la ANPC hace hincapié en evitar las costosas aportaciones externas de fertilizantes y plaguicidas, de modo que ayuda a los agricultores a no asumir deudas y favorece alternativas orgánicas para mejorar la materia orgánica del suelo, su biología y fertilidad. En el estado de Andra Pradesh, la rápida difusión de la ANPC entre miles de agricultores entusiastas recibe el apoyo de una alianza entre BNP Paribas, el Programas de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Centro Mundial de Agrosilvicultura (CIIA), por medio del Servicio de Financiación para una India Sostenible (SIFF). Este planteamiento innovador se basa en préstamos que facilitan la inversión y la ampliación y que reembolsa el Gobierno, ya que se ahorrará muchas subvenciones a los fertilizantes cuando su uso se reduzca^{40,41}.

De cara a un enfoque internacional holístico del nitrógeno

Resulta alentador que algunos países estén poniendo a prueba enfoques más integrados para la gestión del nitrógeno. Por ejemplo, Alemania reaccionó con rapidez a la Evaluación Europea del Nitrógeno y comenzó a elaborar una estrategia integrada sobre el nitrógeno^{23,44}. La dificultad para muchos países reside en la división entre diversos ministerios de la respuesta a los peligros del nitrógeno, lo que dificulta la coordinación de las medidas. En el Brasil, la actividad agrícola sigue expandiéndose en grandes superficies, y no se ha atendido expresamente la necesidad de desvincular mejor los cultivos y la cría de animales con efectos sobre el medio ambiente⁴⁵. En el plano internacional, también hay que legislar con claridad y adoptar medidas de políticas sobre las consecuencias transfronterizas del N_r.

Los miembros de la Iniciativa Internacional del Nitrógeno (IIN) han reflexionado profundamente sobre estos retos. La primera medida ha consistido en colaborar con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente con objeto de establecer un enfoque coordinado en relación con el respaldo científico para el desarrollo de políticas internacionales, que se ha plasmado en el Sistema Internacional de Gestión del Nitrógeno (INMS).

Con la ayuda del Fondo para el Medio Ambiente Mundial y 80 organizaciones asociadas, el INMS está elaborando directrices relativas a la gestión del nitrógeno, la integración de los flujos y efectos, la valoración de los costos y beneficios, y posibles

Video: La contaminación atmosférica procedente de la agricultura



Enlace: https://www.youtube.com/watch?v=07P_wXTTusi
Fotografía: gillmar / Shutterstock.com

© Unión Europea

Video: Importancia de los fertilizantes para el medio ambiente y para sus beneficios



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=5TzzPOy1T3g>
Fotografía: Visual Generation / Shutterstock.com

© Fondo de Defensa del Medio Ambiente

escenarios de futuro relacionados con el nitrógeno. Asimismo, está celebrando exhibiciones regionales con varios países para demostrar cómo puede resultar útil la gestión holística del nitrógeno. Uno de los resultados clave será la primera Evaluación Mundial del Nitrógeno, cuya publicación está prevista para 2022.

El siguiente reto consistirá en elaborar un marco de políticas más consistente sobre el ciclo del nitrógeno, cuya necesidad se aprecia claramente en las numerosas resoluciones pertinentes para el nitrógeno de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente: 2/6 (Acuerdo de París), 2/7 (Productos químicos y desechos), 2/8 (Consumo y producción sostenibles), 2/9 (Residuos de alimentos), 2/10 (Océanos), 2/12 (Arrecifes de coral), 2/24 (Degradación de las tierras), 3/4 (Medio ambiente y salud), 3/6 (Suelos), 3/8 (Calidad del aire) y 3/10 (Contaminación del agua)^{46,47}. Su propósito se expone con claridad en la Resolución 3/8, que alienta a los Gobiernos a aprovechar los efectos sinérgicos de la gestión eficiente del nitrógeno para reducir la contaminación atmosférica, marina y del agua.

En los últimos debates de las comunidades científicas y sobre políticas se ha analizado el modo de coordinar con más eficacia la participación en las políticas relativas al nitrógeno⁴⁸. A continuación se enumeran algunas de las posibilidades:

Opción 1: Fragmentación del nitrógeno en diversos marcos de políticas: la situación actual

Opción 2: Liderazgo en el ámbito del nitrógeno de acuerdo con un marco de políticas previo. Plantea dificultades en relación con el mandato, dado que los acuerdos ambientales multilaterales vigentes solo abordan determinados elementos del reto.

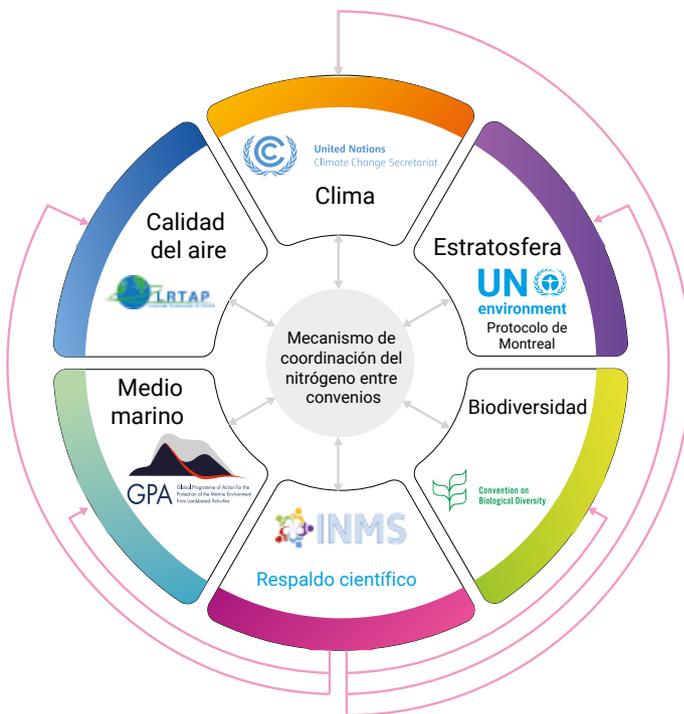
Opción 3: Nuevo convenio internacional para hacer frente al reto del nitrógeno. En este momento se observa poca disposición a aceptar este enfoque.

Opción 4: Un «mecanismo de coordinación del nitrógeno entre convenios» con el que se establezca un foro intergubernamental de cooperación entre organismos sobre la cuestión del nitrógeno, quizá bajo el mandato de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente.

Actualmente no existe tal mecanismo de coordinación, lo que limita la medida en que los acuerdos ambientales multilaterales aprenden unos de otros; además, no es eficiente que el INMS tenga que trabajar por separado con diversos acuerdos multilaterales. Contar con un mecanismo de coordinación serviría para hacer partícipes activos a los Estados Miembros y a los acuerdos ambientales multilaterales pertinentes. Los grupos principales y las partes interesadas del PNUMA ya facilitan la participación de las empresas y la sociedad civil. Cabe señalar que la opción 4 todavía no es más que eso: otra opción más. Corresponde a los Gobiernos nacionales debatir qué enfoque resultaría más ágil, eficiente y rentable.

Sin embargo, de ese debate surge otro beneficio. Cada vez es más evidente que la sociedad mundial necesita un enfoque holístico de los conocimientos científicos y las políticas referentes al nitrógeno. En primer lugar, una perspectiva con múltiples fuentes y sectores posibilita sinergias y la consideración de compensaciones. Resultaría provechosa para la agricultura y la industria, que dispondrían de un fundamento más consistente de cara a la adopción de decisiones empresariales. En segundo lugar, el enfoque holístico sienta las bases para desarrollar la perspectiva de la economía circular, fundamental con vistas a impulsar el cambio. Además, con un planteamiento de ese tipo en la cuestión del nitrógeno se demostraría que es posible que las futuras políticas ambientales coordinen de manera más eficaz cuestiones diversas. En un momento en el que el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente trabaja en pro de su estrategia para «Un planeta sin contaminación», es probable que se extraigan lecciones especialmente relevantes para las cuestiones de contaminación interrelacionadas.

Mecanismo de coordinación del nitrógeno entre convenios



Video: El reto del amoníaco en la agricultura



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=y0IG5mOWyAs>
Fotografía: Mark Sutton

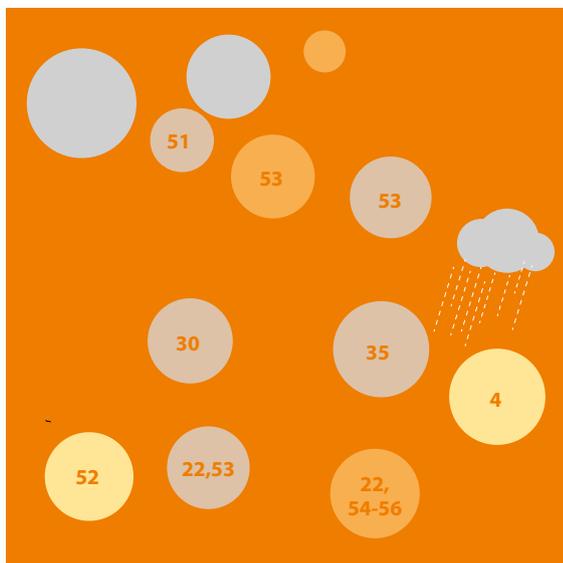
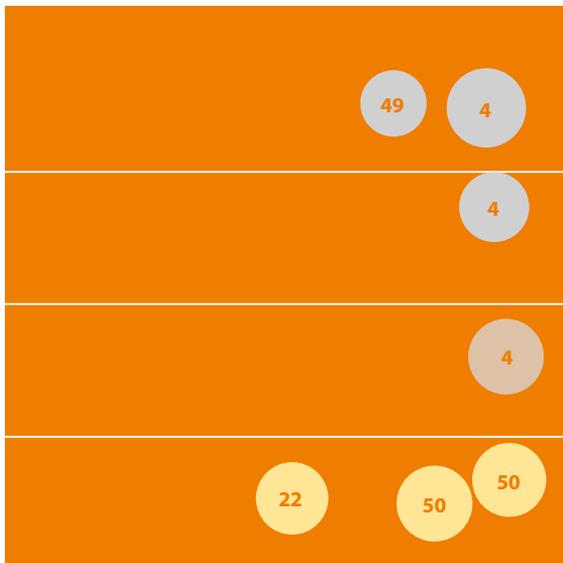
© CAFREtv

Bibliografía

- United Nations Environment Programme (2014). *UNEP Year Book 2014*. Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9240>
- Duce, R.A., LaRoche, J., Altieri, K., Arrigo, K.R., Baker, A.R., Capone, D.G. *et al.* (2008). Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science* 320, 893–897. <https://doi.org/10.1126/science.1150369>
- Voss, M., Bange, H.W., Dippner, J.W., Middelburg, J.J., Montoya, J.P. and Ward, B. (2013). The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130121–20130121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0121>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erismán, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P. van Grinsven, H. and Grizzetti, B. (eds.) (2011). *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <http://www.nine-esf.org/node/360/ENA-Book.html>
- Pearce, F. (2018). Can the world find solutions to the nitrogen pollution crisis? *Yale Environment* 360, 6 February. <http://e360.yale.edu/features/can-the-world-find-solutions-to-the-nitrogen-pollution-crisis>
- Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z. *et al.* (2013). Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature* 494, 459–462. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11917>
- Fowler, D., Steadman, C.E., Stevenson, D., Coyle, M. Rees, R.M. Skiba, U.M. *et al.* (2015). Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 13849–13893. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13849-2015>
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- United Nations Environment Programme (2013). *Drawing Down N₂O to Protect Climate and the Ozone Layer: A UNEP Synthesis Report*. Alcamo, J., Leonard, S.A., Ravishankara, A.R. and Sutton, M.A. (eds.) Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8489>
- Suddick, E.C., Whitney, P., Townsend, A.R. and Davidson, E.A. (2012). The role of nitrogen in climate change and the impacts of nitrogen–climate interactions in the United States: foreword to thematic issue. *Biogeochemistry* 114, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9795-z>
- Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W. *et al.* (2013). Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh, UK: NERC/Centre for Ecology & Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/>
- Abrol, Y.P., Adhya, T.K., Aneja, V.P., Raghuram, N., Pathak, H., Kulshrestha, U., Sharma, C. and Singh, B. (eds.) (2017). *The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*. UK: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128118368/the-indian-nitrogen-assessment>
- Van Grinsven, H.J.M., Holland, M., Jacobsen, B.H., Klimont, Z., Sutton, M.A. and Willems, W.J. (2013). Costs and benefits of nitrogen for Europe and implications for mitigation. *Environmental Science & Technology* 47, 3571–3579. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es303804g>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (2018). *Human Acceleration of the Nitrogen Cycle: Managing Risk and Uncertainty*. Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307438-en>
- Brunekreef, B., Harrison, R.M., Künzli, N., Querol, X., Sutton, M.A., Heederik, D.J.J. *et al.* (2015) Reducing the health effect of particles from agriculture. *Lancet Respiratory Medicine* 3(11), 831–832. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(15\)00413-0](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(15)00413-0)
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D. *et al.* (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change* 26, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Leip, A., Wagner, S., De Marco, A. *et al.* (2015). *Nitrogen on the Table: The influence of food choices on nitrogen emissions and the European environment*. European Nitrogen Assessment Special Report on Nitrogen and Food. UK: Centre for Ecology & Hydrology. https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/Nitrogen_on_the_Table_Report_WEB.pdf
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.J., Lassaletta, L. *et al.* (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Brownlie W.J., Howard, C.M., Pasda, G., Nave, B., Zerulla, W. and Sutton, M.A. (2015). Developing a global perspective on improving agricultural nitrogen use. *Environmental Development* 15, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.002>
- EU Nitrogen Expert Panel (2015). *Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in food systems*. Wageningen, NL: Wageningen University. <http://www.eunep.com/wp-content/uploads/2017/03/N-ExpertPanel-NUE-Session-1.pdf>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Brownlie, W.J., Skiba, U., Hicks, K.W., Winiwarter, W. *et al.* (2017). The European Nitrogen Assessment 6 years after: What was the outcome and what are the future research challenges? In *Innovative Solutions for Sustainable Management of Nitrogen*. Dalgaard, T. *et al.* (eds). Aarhus, Denmark, 25–28 June. Aarhus, DK: Aarhus University and the dNmark Research Alliance. http://sustainableconference.dnmark.org/wp-content/uploads/2017/06/JYC_Final_Book-of-abstracts160617.pdf
- Reis, S., Bekunda, M. Howard, C.M., Karanja, N. Winiwarter, W., Yan, X. *et al.* (2016). Synthesis and review: Tackling the nitrogen management challenge: from global to local scales. *Environmental Research Letters* 11, 120205. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/12/120205/meta>
- Umweltbundesamt (2015). *Reactive Nitrogen in Germany: Causes and effects - measures and recommendations*. Dessau-Roßlau: The German Environment Agency (Umweltbundesamt). <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/reactive-nitrogen-in-germany>

24. Tomich T.P., Brodt, S.B., Dahlgren, R.A. and Scow, K.M. (eds.) (2016). Davis, CA: University of California Press. <http://asi.ucdavis.edu/programs/sarep/research-initiatives/are/nutrient-mgmt/california-nitrogen-assessment>
25. Galloway J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R. et al. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
26. Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. and Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636-639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
27. Davidson, E.A., Davidson, M.B., David, J.N., Galloway, C.L., Goodale, R., Haeuber, J.A. . (2012). Excess nitrogen in the U.S. environment: trends, risks, and solutions. 15. The Ecological Society of America, Washington. <http://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2013/03/issuesinecology15.pdf>
28. Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M.A., Cape, J.N., Reis, S. (2013). The global nitrogen cycle of the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B*. 368, 2130164. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
29. Bleeker, A., Sutton, M., Winiwarter, W. and Leip, A. (2013) *Economy Wide Nitrogen Balances and Indicators: Concept and Methodology*. OECD, Environment Directorate, Environment Policy Committee, Working Party on Environmental Information, Paris, France ENV/EPOC/WPEI(2012)4/REV1. Paris. <http://inms.iwlearn.org/inms-meeting-lisbon/NBalancesandIndicators.pdf>
30. Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H. and Winiwarter, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature* 472, 159-161. <https://doi.org/10.1038/472159a>
31. Masso, C., Baijukya, F., Ebanyat, P., Bouaziz, S., Wendt, J., Bekunda, M. et al. (2017). Dilemma of nitrogen management for future food security in sub-Saharan Africa – a review. *Soil Research* 55(6), 425-434. <https://doi.org/10.1071/SR16332>
32. United Nations Statistic Division (2018). *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York. A/RES/71/313 E/CN.3/2018/2. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>
33. Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P. and Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
34. Sutton, M.A., Reis, S., Riddick, S.N., Dragosits, U., Nemitz, E., Theobald, M.R. et al. (2013). Toward a climate-dependent paradigm of ammonia emission & deposition. *Phil. Trans. Roy. Soc. (Ser. B)* 368, 20130166. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0166>
35. Van Grinsven, H.J., Tiktak, A. and Rougoor, C.W. (2016). Evaluation of the Dutch implementation of the nitrates directive, the water framework directive and the national emission ceilings directive. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 78, 69-84. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.010>
36. Bittman, S., Dedina, M., Howard C.M., Oenema, O. and Sutton, M.A. (eds.) (2014). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510206/1/N510206CR.pdf>
37. Gu, B.J., Ju, X.T., Chang, J., Ge, Y. and Vitousek, P.M. (2015). Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. 112, 8792-8797. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510211112>
38. Ju, X.T., Gu, B.J., Wu, Y.Y. and Galloway, J.N. (2016). Reducing China's fertilizer use by increasing farm size. 41, 26-32. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806645115>
39. Mangano E., Kahr, J., Wright, P.A. and Brandani, S. (2016). Accelerated degradation of MOFs under flue gas conditions. *Faraday Discussions*, 192. <https://doi.org/10.1039/C6FD00045B>
40. Food and Agriculture Organization (2016). Zero Budget Natural Farming in India. *Agroecology Knowledge Hub Trends in Biosciences Circular Economy Package: Questions & Answers*. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>.
41. Bishnoi, R. and Bhati, A. (2017) An Overview : Zero Budget Natural Farming. *Trends in Biosciences* 10(46), 9314-9316
42. European Commission (2015). Circular Economy Package: Questions & Answers. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm
43. European Commission (2015). Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2015) 614 final. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>
44. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015). *Nitrogen: Strategies for resolving an urgent environmental problem - Summary*. Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/02_Special_Reports/2012_2016/2015_01_Nitrogen_Strategies_summary.html
45. Austin, A.T., Bustamante, M.M.C., Nardoto, G.B., Mitre, S.K., Perez, T., Ometto, J.P.H.B. et al. (2013). Latin America's Nitrogen Challenge. *Science* 340, 149. <https://doi.org/10.1126/science.1231679>
46. United Nations Environment Programme (2018). *Resolutions and Decisions: UNEA 2*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/resolutions-and-decisions-unea-2>
47. United Nations Environment Programme (2018). *Documents: Third session of the UN Environment Assembly*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/node/40741>
48. Sutton, M. (2018). The global nitrogen challenge: a case of too much and too little nutrients. A presentation to the Committee of Permanent Representatives to the United Nations Environment Programme, 24 October 2018. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26379/Sutton%20Global%20Nitrogen%20Challenge%20%28UNEP%20CPR%20Oct%202018%29.pdf?sequence=24&isAllowed=y>

Referencias gráficas



49. Zhang, R., Tie, X. and Bond, D.W. (2002). Impacts of anthropogenic and natural NOx sources over the U.S. on tropospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(4), 1505-1509. <https://doi.org/10.1073/pnas.252763799>
50. FAO (2011). *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>
51. Ussiri D., Lal R. (2013) *Global Sources of Nitrous Oxide*. In: *Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5364-8_5
52. IFA (2018). *International Fertilizer Association database (IFASTAT)*. International Fertilizer Association, Paris. <https://www.ifastat.org/>
53. Behera, S.N., Sharma, M., Aneja, V.P. and Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8092-8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>
54. Field, C.D., Dise, N.B., Payne, R.J., Britton, A.J., Emmett, B.A., Helliwell, R.C., Hughes, S, et al. 2014. The Role of Nitrogen Deposition in Widespread Plant Community Change Across Semi-natural Habitats. *Ecosystems*, 17, 864-877. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9765-5>
55. Payne, R. J., N. B. Dise, C. J. Stevens, D. J. Gowing, and Begin Partners. 2013. 'Impact of Nitrogen Deposition at the Species Level'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(3): 984–87. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214299109>
56. Sheppard, L. J., Leith, I. D., Mizunuma, T., Cape, N., Crossley, A., Leeson, S., Sutton, M.A., Dijk, N. and Fowler, D. (2011). Dry deposition of ammonia gas drives species change faster than wet deposition of ammonium ions: evidence from a long-term field manipulation'. *Global Change Biology*, 17: 3589-3607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02478.x>