



MAYO DE 2026
R:26-05-B

INFORME

LA CRISIS DE CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO

CÓMO EL USO EXCESIVO DE FERTILIZANTES ESTÁ CONTAMINANDO
EL AGUA, EL AIRE Y LOS ECOSISTEMAS DE LOS ESTADOS UNIDOS



AUTORES:

J.P. Rose, Daniel Rath, Arohi Sharma, Maya Korb, Matthew Kaplan

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los siguientes revisores por sus útiles comentarios (en orden alfabético): Joy Anderson, Mike Badzmierowski, Steve Fleischli, Laurie Geller, Rebecca Hammer, Andrew Hillman, Carly Griffith, Allison Johnson, Erik Olson, Vero Ramos Kuzuhara, Rebecca Riley, Leah Stecher, Jesse Womack, así como varios revisores anónimos.

Acerca del NRDC

El Consejo de Defensa de Recursos Naturales (Natural Resources Defense Council, NRDC) es una organización ambiental internacional sin fines de lucro con más de 3 millones de miembros y activistas en línea. Fundado en 1970, el NRDC utiliza la ciencia, la política, la ley y el poder popular para enfrentar la crisis climática, proteger la salud pública y salvaguardar la naturaleza. El NRDC tiene oficinas en la ciudad de Nueva York, Washington, D.C., Los Ángeles, San Francisco, Chicago, Bozeman (Montana), Pekín y Delhi (una oficina de NRDC India Pvt. Ltd.). Visítenos en www.nrdc.org y síguenos en Instagram @nrdc_org.

Directora de Comunicaciones del NRDC: Kristin Wilson-Palmer

Editora sénior de publicaciones de políticas del NRDC: Leah Stecher

Directora de revisión por pares del NRDC, Oficina de Ciencias: Laurie Geller

Imagen de la portada: © USDA

Diseño y producción: www.suerossi.com

© Consejo de Defensa de Recursos Naturales 2026

Resumen ejecutivo 4

I. Introducción 5

II. La contaminación por nitrógeno amenaza a las comunidades, los ecosistemas y las granjas 6

III. La contaminación por nitrógeno perjudica a la economía10

IV. Los estatutos y la infraestructura existentes no alcanzan para reducir la contaminación por nitrógeno 13

V. Minnesota y California evidencian la necesidad de contar con una gestión estatal sólida y rigurosa16

VI. Los estándares exigibles ayudarán a resolver la crisis de contaminación por nitrógeno 20

VII. Un mejor seguimiento de las emisiones de óxido nitroso provenientes de los fertilizantes es clave para abordar la crisis climática 23

VIII. Conclusión 24

Apéndice: Preguntas frecuentes sobre la crisis de contaminación por nitrógeno 25

RESUMEN EJECUTIVO

La fertilización de los cultivos con nitrógeno hizo posible la agricultura moderna al reponer los nutrientes del suelo y aumentar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, esta importante herramienta se utiliza actualmente en exceso. De hecho, estudios realizados en varios estados muestran que muchos agricultores aplican significativamente más nitrógeno del recomendado por las universidades públicas de investigación agrícola, mientras hacen un uso limitado de prácticas que minimizan la escorrentía de nitrógeno.¹ Como resultado, casi la mitad del fertilizante nitrogenado que se aplica a las tierras de cultivo ni siquiera es utilizado por las plantas; en cambio, se escurre hacia ríos y aguas subterráneas o se libera al aire. En algunos lugares y para ciertos cultivos, la proporción asciende a más de la mitad.²

Este nitrógeno que se pierde no es inofensivo. Las aguas subterráneas contaminadas con nitratos se han vinculado con el síndrome del bebé azul, ciertos tipos de cáncer y trastornos de la tiroides, mientras que las emisiones gaseosas de nitrógeno contribuyen a la contaminación del aire por partículas finas y precursores de esmog que exacerban el asma y otras enfermedades respiratorias.³ El exceso de nitrógeno puede devastar los ecosistemas acuáticos al favorecer la floración de algas nocivas y crear “zonas muertas” con bajo contenido de oxígeno que asfixian a los seres acuáticos. Además, contribuye a la crisis climática a través de las emisiones de óxido nitroso (N₂O), un gas de efecto invernadero con una capacidad de retener calor aproximadamente 273 veces mayor que la del dióxido de carbono.⁴

La gestión inadecuada del nitrógeno le cuesta a la economía de los EE. UU. miles de millones de dólares, una carga que recae principalmente sobre las comunidades rurales y de bajos ingresos. El fertilizante nitrogenado (definido en este informe como fertilizante nitrogenado sintético o estiércol) puede representar una pequeña o gran parte del presupuesto operativo de una granja, dependiendo del cultivo. No obstante, entre el 40 y el 60 por ciento del nitrógeno aplicado que los cultivos no utilizan representa mucho más que un gasto innecesario para los agricultores, especialmente cuando se trata de la contaminación del agua.⁵ Los sistemas de abastecimiento de agua pequeños y rurales, que conforman la gran mayoría de los proveedores de agua en los EE. UU., enfrentan costos de tratamiento desproporcionados para eliminar el exceso de nitrógeno porque carecen de los recursos para financiar mejoras en los sistemas de filtración o cambiar a fuentes de agua no contaminadas.⁶ La contaminación por nitrógeno puede obligar a los estados a realizar importantes gastos en programas provisionales de suministro de agua embotellada, respuestas de emergencia ante floraciones de algas y proyectos de restauración de hábitats. Las pérdidas económicas en actividades recreativas derivadas de las floraciones de algas nocivas, causadas en parte por la contaminación por nitrógeno, ascienden a decenas de miles de millones de dólares anuales cuando las playas cierran, las rampas para embarcaciones permanecen inactivas y las pesquerías se ven afectadas.⁷

LOS PROGRAMAS VOLUNTARIOS DE REDUCCIÓN DE NITRÓGENO SON NECESARIOS PERO NO SUFICIENTES

Los estados se han apoyado en gran medida en la educación, la asistencia técnica y los incentivos para fomentar las mejores

prácticas de gestión a fin de reducir la contaminación por nitrógeno en el agua. Por ejemplo, la principal iniciativa de subvenciones de agricultura sostenible de California, el Programa de Suelos Saludables, ha otorgado más de 162 millones de USD a los agricultores para implementar prácticas que reducen el potencial de pérdida de nitrógeno, como el uso de cultivos de cobertura, la reducción de la labranza, el uso de setos y cortavientos, la rotación de diversos cultivos y la aplicación de compost.⁸ Si bien estos esfuerzos voluntarios han dado lugar a cierta adopción de prácticas y a una mayor conciencia del uso excesivo de nitrógeno, no pueden lograr por sí solos las mejoras necesarias en la calidad del agua. Después de décadas de esfuerzos voluntarios, muchos cuerpos de agua siguen afectados, más cuerpos de agua se están contaminando, más pozos de agua potable están arrojando niveles altos de nitrato y los costos de tratamiento continúan aumentando.⁹

LOS ESTADOS DEBEN ESTABLECER LÍMITES MEDIBLES PARA FRENAR LA CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO

Los marcos exitosos de control de la contaminación contienen límites claros y medibles que alinean los incentivos con los resultados. Cuando los organismos reguladores establecen objetivos numéricos, monitorean el desempeño y hacen cumplir las normas frente a quienes se apartan significativamente de ellas, se logran avances. Cuando no lo hacen, las comunidades, los contribuyentes y los ecosistemas siguen pagando las consecuencias.

Los estados deben establecer objetivos claros para abordar la aplicación excesiva y las descargas de nitrógeno que degradan la calidad del agua. Pueden exigir una recopilación rigurosa de datos que les permita dirigir la ayuda donde más se necesita y medir los avances. También pueden combinar límites exigibles y orientados a resultados con asistencia técnica e incentivos, lo que garantiza que tanto las granjas pequeñas como las grandes puedan cumplir y prosperar. Asimismo, pueden exigir responsabilidad compartida por los resultados para que las empresas de fertilizantes y los minoristas que se benefician de la aplicación excesiva sean, junto con los agricultores, parte de la solución.

Las comunidades no deben verse obligadas a elegir entre tener agua limpia y producir alimentos. La situación actual es desigual, costosa e insostenible. Tenemos la responsabilidad de cambiarla. La buena noticia es que también tenemos las herramientas para hacerlo.

I. INTRODUCCIÓN

Tener suficiente nitrógeno disponible en el suelo es fundamental para el crecimiento de las plantas. Antes del siglo XX, los aportes humanos de nitrógeno al suelo solo estaban disponibles a partir de fuentes como el estiércol y los residuos de cultivos de leguminosas, lo que hacía que su presencia fuera uno de los principales factores determinantes de lo que podía producir una hectárea de tierra de cultivo.¹⁰ Cuando los científicos descubrieron cómo producir fertilizante nitrogenado sintético mediante el proceso Haber-Bosch, de alto consumo energético, a principios del siglo XX, los agricultores finalmente tuvieron una fuente confiable de nitrógeno para ampliar la producción de cultivos y obtener rendimientos sin precedentes. Sin embargo, el acceso económico y confiable al fertilizante nitrogenado rápidamente llevó a una aplicación excesiva. Entre 1960 y 2000, la cantidad de fertilizante nitrogenado aplicada a los sistemas agrícolas se triplicó con creces y la cantidad de nitrógeno liberada al medioambiente se incrementó de manera similar.¹¹

La gestión inadecuada del fertilizante nitrogenado causa estragos en los ecosistemas locales, amenaza la salud humana, contribuye a la crisis climática y le cuesta a la economía de los EE. UU. miles de millones de dólares al año. Hay una solución clara: reducir la aplicación excesiva e implementar prácticas para minimizar la escorrentía de nitrógeno. La buena noticia es que los agricultores están demostrando que es posible y rentable producir alimentos saludables para las comunidades sin contaminar el agua con exceso de nitrógeno. En todo el país, los agricultores están reduciendo drásticamente la contaminación por nitrógeno sin sacrificar la productividad al reducir la aplicación excesiva y adoptar prácticas agrícolas sostenibles como la gestión adaptativa del nitrógeno, los cultivos de cobertura, el control de la contaminación en los bordes de los campos y la rotación diversificada de cultivos.

Sin embargo, las políticas actuales crean condiciones desiguales, en las que los intereses de la agricultura industrial no rinden cuentas por la contaminación continua, mientras que las prácticas agrícolas sostenibles no son debidamente recompensadas.

Este informe explica la magnitud y las fuentes de la crisis de contaminación por nitrógeno, quién paga sus consecuencias y por qué los enfoques actuales para reducir la contaminación por nitrógeno no han sido suficientes. También propone medidas prácticas que los responsables de formular políticas y otras partes interesadas pueden adoptar desde ahora para revertir esta situación. No pretende ser una descripción general integral de los daños ambientales o económicos de otras prácticas agrícolas.

La reforma de la política de nitrógeno favorece a los agricultores, las comunidades, la salud y la tecnología. Premiará a los agricultores que ya están utilizando prácticas eficaces de gestión del nitrógeno, guiará a otros agricultores hacia esas soluciones y protegerá a sus comunidades de la contaminación. La recompensa es agua más limpia, segura y asequible; ríos, lagos y costas más saludables; menos contaminación del aire; y beneficios climáticos significativos gracias a menores emisiones de óxido nitroso. A continuación se presenta una descripción general del resto de este informe.

- La **Sección II** detalla cómo la crisis de contaminación por nitrógeno no es un problema aislado de política agrícola, sino un problema generalizado que pone en peligro la salud humana, daña los ecosistemas, amenaza la biodiversidad y contribuye al cambio climático.
- La **Sección III** cuantifica la carga económica de la crisis de contaminación por nitrógeno, incluidos los costos de remediación del agua potable, la limpieza de las floraciones de algas nocivas y la disminución de las oportunidades recreativas.
- La **Sección IV** evalúa las deficiencias de las principales herramientas federales existentes que podrían utilizarse para reducir la contaminación por nitrógeno, incluidas la Ley de Agua Limpia, la Ley de Agua Potable Segura y los programas federales de conservación.
- La **Sección V** presenta estudios de caso de éxito desigual en la gestión del nitrógeno de Minnesota y California. Minnesota ilustra cómo las inversiones en prácticas voluntarias solo han logrado reducciones limitadas de la contaminación. California muestra cómo la recopilación rigurosa de datos puede constituir la base para una política más inteligente y específica, e ilustra las consecuencias de no combinar esos datos con límites exigibles a la aplicación excesiva y la escorrentía de nitrógeno.
- La **Sección VI** establece soluciones que los estados pueden adoptar ahora, incluido el monitoreo y los informes basados en resultados, junto con límites numéricos sobre la aplicación excesiva y la escorrentía de nitrógeno.
- La **Sección VII** destaca la necesidad de un mejor seguimiento del óxido nitroso, el “supercontaminante olvidado”, principal impulsor del cambio climático por el exceso de fertilizante.
- La **Sección VIII** contiene una breve conclusión.
- El **Apéndice** aborda las preguntas frecuentes sobre la crisis de contaminación por nitrógeno y ofrece respuestas basadas en evidencia.

© Nicholas Aumen/USGS



Floración de algas nocivas en el lago Okeechobee.

II. LA CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO AMENAZA A LAS COMUNIDADES, LOS ECOSISTEMAS Y LAS GRANJAS

La ciencia es inequívoca: el uso excesivo de nitrógeno pone en peligro a las personas, degrada los ecosistemas y contribuye a la crisis climática.¹² Esta sección resume décadas de investigación que vinculan la contaminación por nitrógeno con estos impactos transversales (consulte la figura 1).¹³

CONTAMINACIÓN TÓXICA DEL AGUA POTABLE

El exceso de nitrógeno puede filtrarse en los cuerpos de agua en forma de nitrato, uno de los principales contaminantes del agua potable. Los riesgos para la salud asociados con la contaminación por nitratos se detectaron por primera vez en lactantes en 1945, cuando se observó que algunos recién nacidos expuestos a altos niveles de nitratos presentaban defectos congénitos o bajos niveles de oxígeno (también conocido como síndrome del bebé azul).¹⁴ En 1991, esta conexión llevó a la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) a establecer un nivel máximo de contaminante (Maximum Contaminant Level, MCL) de 10 miligramos por litro (mg/L) de nitrato en el agua potable.

Sin embargo, los estudios muestran que este MCL se supera regularmente en muchas fuentes de agua potable y es probable que se supere en muchas cuencas de agua subterránea en todo el país (consulte la figura 2).¹⁵ Estudios más recientes revelan que la contaminación por nitratos a niveles inferiores al MCL

también puede ser perjudicial para niños y adultos. La ingesta de nitratos del agua contaminada se asocia con un mayor riesgo de cáncer colorrectal, de ovario y de riñón en concentraciones de apenas 5 mg/L.¹⁶ La ingesta de nitratos tanto del agua contaminada como de los alimentos también se asocia con el cáncer de tiroides y problemas de salud relacionados.¹⁷



© Katie Nichols/ACES

FIGURA 1: EL EXCESO DE NITRÓGENO DE LOS FERTILIZANTES SE PROPAGA POR EL MEDIOAMBIENTE Y AFECTA LA SALUD HUMANA Y AMBIENTAL

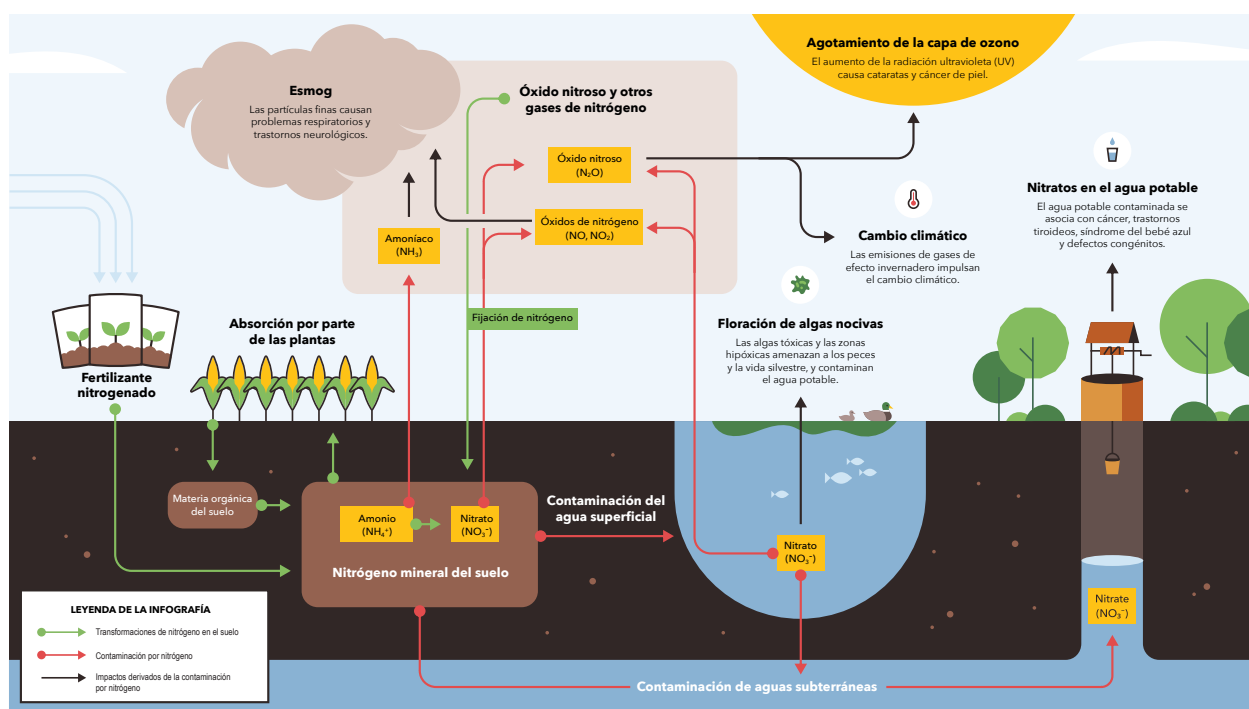


Ilustración: Maya Nguyen para el NRDC

Para proporcionar cierta perspectiva sobre el impacto del agua potable contaminada, en áreas donde la concentración de nitrato en el agua potable es de 10 mg/L, consumir aproximadamente 8 onzas (225 ml) de agua expone a una persona a una cantidad de nitrato equivalente a la de comer un perro caliente.¹⁸ Los perros calientes y otras carnes procesadas han sido clasificados por la Organización Mundial de la Salud como carcinógenos del Grupo 1 (al igual que el tabaco y el asbesto) debido, en parte, a la cantidad de evidencia que vincula el contenido de nitrato/nitrito en la carne procesada y el riesgo de cáncer.¹⁹ Si una persona bebe los ocho vasos de agua recomendados por día durante todo un año, estaría consumiendo una cantidad de nitrógeno en forma de nitrato equivalente a la de ingerir 2920 perros calientes.

El fuerte vínculo entre la ingesta de nitratos y el cáncer colorrectal puede ser uno de los factores que impulsan el aumento anual del 3 por ciento en el cáncer colorrectal en personas de entre 20 y 49 años.²⁰ Un estudio reciente estimó que el nitrato en el agua potable puede ser responsable de hasta 12 594 casos de cáncer cada año en los Estados Unidos (al menos el 54 por ciento de los cuales son casos de cáncer colorrectal) a un costo adicional de hasta 1,5 mil millones de USD al año para el tratamiento médico.²¹

Un estudio de 2014 estimó que 5,6 millones de estadounidenses que utilizaban sistemas de agua comunitarios estaban expuestos a niveles inseguros de nitratos (por encima de 5 mg/L) a pesar de la infraestructura existente de tratamiento de agua diseñada para proteger a las personas de los contaminantes del agua potable.²² Esta estimación es casi seguramente inferior a la cifra real porque el estudio excluyó a los 44 millones de estadounidenses que dependen de pozos privados.²³ Las personas que dependen de pozos privados a menudo tienen un riesgo aún mayor de contaminación por nitratos en el agua potable debido a su proximidad a tierras de cultivo, la falta de infraestructura de tratamiento de agua y la realización irregular de pruebas de calidad del agua de los pozos.²⁴

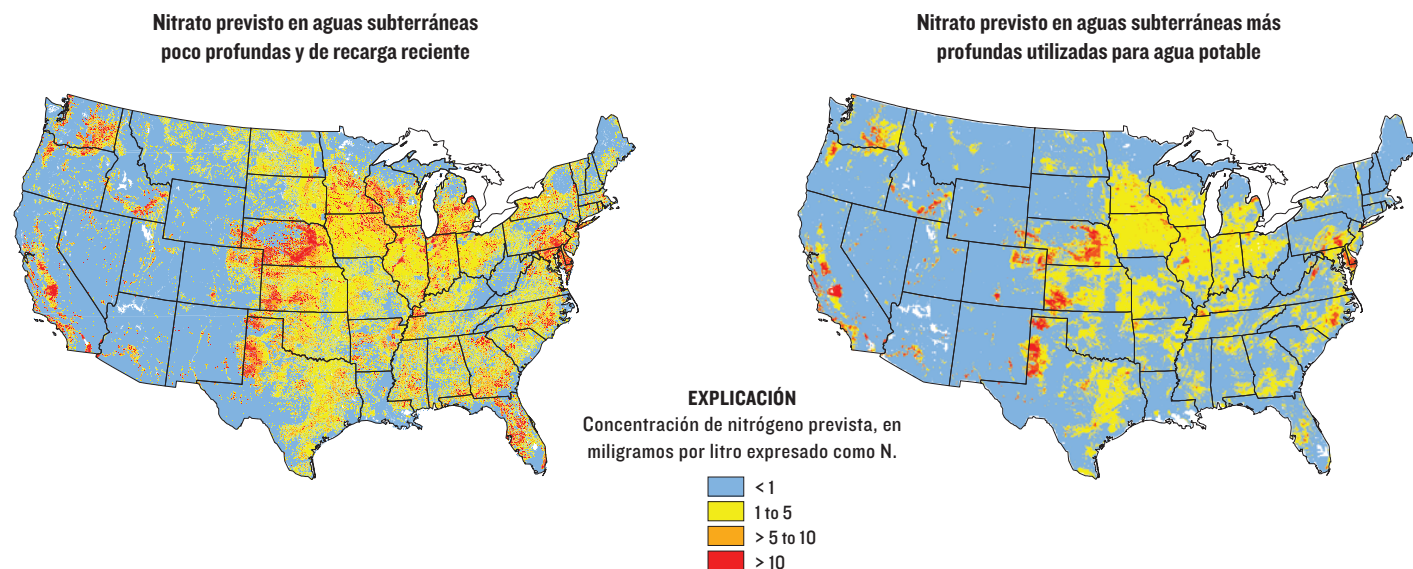
La contaminación por nitratos en el agua potable no afecta a los estadounidenses por igual. En todo el país, los sistemas comunitarios de abastecimiento de agua que prestan servicio a una mayor proporción de comunidades latinas, como en el valle de San Joaquín en California, experimentan niveles más altos de nitrato en el agua potable.²⁶ En el Medio Oeste, las áreas con altos niveles de nitrato en el agua potable suelen coincidir con áreas donde los ingresos de los hogares caen por debajo del ingreso medio estatal.²⁷ Estas comunidades tienen más probabilidades de encontrarse en zonas rurales y agrícolas, donde la calidad del agua es deficiente y las instalaciones de tratamiento a menudo no reciben el mantenimiento ni las mejoras necesarias.²⁸

Lamentablemente, la contaminación por nitrógeno generada hoy puede seguir contaminando el agua potable durante décadas. Se necesita tiempo para que el nitrógeno que se escurre de las tierras agrícolas contamine las aguas superficiales cercanas, se filtre en el agua subterránea y contamine los suministros de agua potable. Cada año que los funcionarios y los agricultores posponen la reducción de la contaminación y la escorrentía puede dar lugar a mayores costos de limpieza y, potencialmente, a más millones de estadounidenses que beben agua contaminada con nitrato.²⁹

ECOSISTEMAS DEGRADADOS Y PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD

Los nitratos degradan los ecosistemas y matan o enferman a aves, peces y otros animales; por ejemplo, pueden hacer que las tortugas marinas verdes desarrollen tumores dolorosos y a menudo mortales en sus cabezas, ojos y aletas.³⁰ En 2022, las altas concentraciones de nitrógeno llevaron a la EPA a clasificar aproximadamente el 44 por ciento de los ríos y arroyos y el 47 por ciento de los lagos en los Estados Unidos como en “mal estado”.³¹ Esta contaminación puede provocar floraciones de algas nocivas, en las que ciertas algas crecen rápidamente y, en el proceso, crean toxinas que pueden enfermar tanto a la vida silvestre como a los seres humanos.³²

FIGURA 2: SE PREVÉ QUE HAYA CONCENTRACIONES DE NITRATO MAYORES QUE EL MCL DE 10 MG/L EXPRESADO COMO NITRÓGENO (N) PRINCIPALMENTE EN LAS LLANURAS ALTAS, EL NORTE DEL MEDIO OESTE Y EN ÁREAS DE AGRICULTURA INTENSIVA EN EL ESTE Y EL OESTE DE LOS ESTADOS UNIDOS²⁵





La contaminación de nutrientes está relacionada con la fibropapilomatosis y los tumores de piel en las tortugas marinas.

El crecimiento de algas también puede crear “zonas muertas”, o sea, áreas con bajos niveles de oxígeno que resultan inhabitables para muchas especies acuáticas e incluso provocar eventos de muerte masiva como la mortandad de peces.³³ La zona muerta más grande del hemisferio occidental cubre 16 835 km² en el Golfo de México y, en gran parte, se debe a la contaminación por nutrientes que fluye por el río Misisipi desde las tierras de cultivo en el Medio Oeste.³⁴

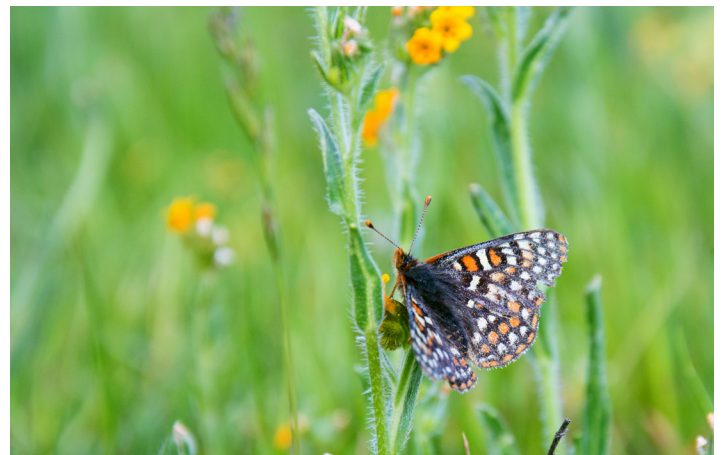
La contaminación por nitrógeno crea hábitats poco saludables que pueden afectar el bienestar y las fuentes de alimentos de muchas especies de animales más allá de las vías fluviales. Dentro de los Estados Unidos, hasta 78 especies actualmente incluidas en la Ley de Especies en Peligro de Extinción están en riesgo debido en parte a la contaminación por nitrógeno, incluidas especies de California como la mariposa ajedrezada de la bahía y el sapo de arroyo.³⁵ Proteger estas especies es importante para el funcionamiento general del ecosistema; muchas desempeñan funciones esenciales en nuestros sistemas alimentarios, la calidad del agua o incluso en entornos recreativos al polinizar plantas, mejorar la salud del suelo y limpiar los suministros de agua.

Además, el nitrógeno circula por la atmósfera y puede depositarse en entornos no agrícolas. El aumento del nitrógeno puede alterar estos entornos al inducir el crecimiento de especies invasoras de rápido crecimiento, que pueden apoderarse de los ecosistemas y suprimir las poblaciones de otras especies de plantas.³⁶ Por ejemplo, en el oeste de los Estados Unidos, la deposición elevada de nitrógeno se ha vinculado con un aumento de los incendios forestales debido a la expansión de pastos secos.³⁷

AIRE PELIGROSO

Cuando los microbios del suelo descomponen el nitrógeno, se emiten desde el suelo varios gases que contienen nitrógeno.

Estos gases incluyen óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), a menudo abreviados juntos como NOx, y amoníaco (NH₃).³⁸ La exposición a niveles elevados de estos gases se ha vinculado a enfermedades respiratorias como el asma, el aumento de las visitas al hospital debido a dificultades respiratorias y trastornos neurológicos.³⁹ Si bien la mayor parte de la contaminación por óxidos de nitrógeno proviene de la combustión de combustibles fósiles, investigaciones recientes sugieren que las emisiones de NOx del suelo pueden ser hasta un orden de magnitud superiores a lo estimado anteriormente y pueden representar aproximadamente del 20 al 30 por ciento de las emisiones anuales de NOx en algunas regiones de los EE. UU.⁴⁰



© Bjorn Erickson/USFWS

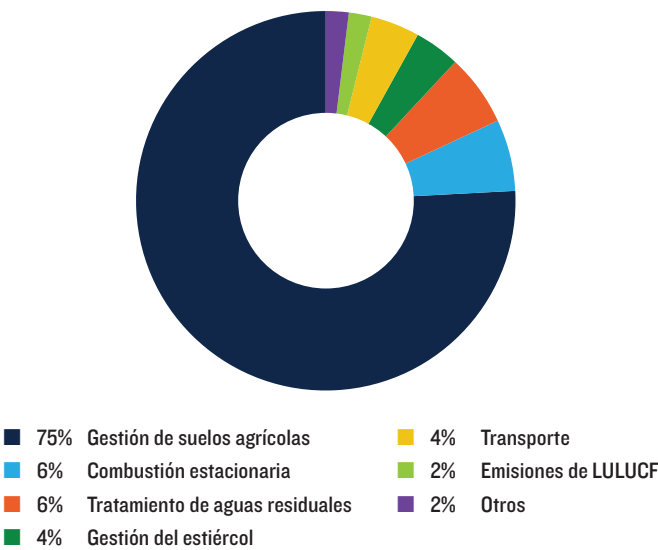
Las mariposas ajedrezadas de la bahía se ven amenazadas por la contaminación por nitrógeno.

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los efectos climáticos del fertilizante nitrogenado sintético comienzan con la producción: el proceso de Haber-Bosch se basa en combustibles fósiles y es extremadamente intensivo en energía, lo que representa alrededor del 2 por ciento del consumo de energía global.⁴¹ Una vez que se aplica fertilizante nitrogenado sintético o estiércol a las tierras de cultivo, el exceso de nitrógeno puede ser descompuesto por microbios del suelo y transformarse en óxido nitroso (N2O), un potente gas de efecto invernadero.⁴² Hasta la fecha, el óxido nitroso representa aproximadamente el 10 por ciento de las emisiones totales de gases de efecto invernadero causadas por el ser humano.⁴³ En los Estados Unidos, la gestión de los suelos agrícolas representa el 75 por ciento de todas las emisiones de óxido nitroso, principalmente por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados (consulte la figura 3).⁴⁴ En la atmósfera, el óxido nitroso es 273 veces más eficaz que el dióxido de carbono, por unidad, para calentar el planeta.⁴⁵ Este gas tiene impactos a largo plazo: puede persistir durante más de 100 años en la atmósfera, donde se suma a los efectos del cambio climático, como una mayor variabilidad de las lluvias y eventos climáticos extremos, lo que puede reducir el rendimiento de los cultivos y poner en peligro los sistemas alimentarios.⁴⁶

El óxido nitroso también contribuye al daño de la capa de ozono estratosférico.⁴⁷ Este daño aumenta la radiación UV y se proyecta que aumentará el riesgo de cáncer de piel y cataratas en las próximas décadas.⁴⁸ Los impactos en la salud asociados al agotamiento del ozono debido a la acumulación de óxido nitroso tienen el potencial de provocar 4 millones de muertes prematuras en los próximos 10 años y 20 millones para 2050.⁴⁹

FIGURA 3: EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO EN LOS EE. UU. DESDE 1990 HASTA 2022, AGRUPADAS POR FUENTE. LULUCF HACE REFERENCIA AL USO DE LA TIERRA, EL CAMBIO EN EL USO DE LA TIERRA Y LA SILVICULTURA⁵⁰



© Peter Essick/Alamy



Las floraciones de algas nocivas impulsadas en parte por la contaminación por nitrógeno pueden abarcar hasta 5180 km².

III. LA CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO PERJUDICA A LA ECONOMÍA

Debido a que la mayoría de los programas para reducir la contaminación por nitrógeno derivada del uso de fertilizantes son solo voluntarios, los organismos reguladores han impuesto requisitos más estrictos a otras fuentes de descarga de nitrógeno, como las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales, para cumplir con los objetivos de limpieza y mejora de la calidad del agua. Esos requisitos más estrictos se traducen en mayores costos para estas otras fuentes de descarga de nitrógeno y para quienes dependen de ellas o se ven afectados por ellas (p. ej., comunidades, empresas y gobiernos locales), aun cuando la agricultura pueda ser una fuente más importante de contaminación por nitrógeno en una zona determinada.

Los costos de la contaminación por nitrógeno son asumidos por los gobiernos estatales y locales, los distritos hídricos y los contribuyentes que pagan los suministros de agua potable de emergencia (p. ej., agua embotellada), la remediación de las floraciones de algas nocivas y las mejoras de las instalaciones de tratamiento de agua para eliminar el exceso de nitrato; también pierden ingresos por disminuciones en

las visitas recreativas.⁵¹ Como afirmó en 2011 un exdirector de asuntos hídricos de la EPA: “La contaminación por nitrógeno y fósforo tiene el potencial de convertirse en uno de los problemas ambientales más costosos y difíciles que enfrentamos”.⁵² De acuerdo con una estimación, los daños económicos brutos de la contaminación agrícola por nitrógeno le cuestan a los Estados Unidos más de 59 mil millones de USD anuales.⁵³ Otro análisis reciente estimó que las emisiones directas de óxido nitroso por el uso excesivo de fertilizantes generan una carga económica nacional de casi 12 mil millones de USD.⁵⁴

Lamentablemente, las comunidades que reciben servicios de distritos hídricos más pequeños y las comunidades que dependen de las aguas subterráneas para su suministro de agua potable (es decir, principalmente las comunidades rurales) asumen una carga desproporcionada de los costos de la contaminación por nitratos.⁵⁵ Las investigaciones muestran que los hogares expuestos al agua contaminada con nitrato tienden a concentrarse en áreas de bajos ingresos con menos recursos financieros para remediar el agua contaminada.⁵⁶

© Mike Blake/Reuters



Las instalaciones de tratamiento de agua potable enfrentan costos adicionales de remediación debido a la contaminación por nitratos.

COSTOS DE LA INFRAESTRUCTURA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA

Cuando los niveles de nitrato en los suministros de agua potable superan el MCL de la EPA de 10 mg/L, los sistemas públicos de agua deben tomar medidas para remediar la contaminación y proporcionar agua potable segura a sus clientes. La remediación puede incluir la mezcla de agua dulce con el suministro de agua contaminada con nitratos, la búsqueda de nuevas fuentes de agua o la instalación y el uso de tecnologías de eliminación de nitrato.⁵⁷

El tratamiento de la contaminación por nitratos puede ser muy costoso, y a estos costos generalmente los asumen las comunidades afectadas.⁵⁸ Columbus, Ohio, gastó 35 millones de USD en una instalación de tratamiento iónico para remediar el agua contaminada con nitratos y abastecer a aproximadamente 400 000 consumidores en 2017.⁵⁹

En la demanda muy publicitada de Des Moines Water Works en Iowa, los demandantes argumentaron que la contaminación por nitratos de la escorrentía agrícola condujo a repetidas violaciones del MCL de nitrato para el río Raccoon, que, junto con el río Des Moines, sirve como la principal fuente de agua potable de la región. En una temporada invernal entre 2012 y 2013, la eliminación de nitrato del río Raccoon le costó a Des Moines Water Works alrededor de 500 000 USD.⁶⁰ Estos enfoques de remediación son costosos y, en muchos casos, pueden resultar insuficientes para contrarrestar los niveles persistentes de contaminación. En 2025, las concentraciones de nitrato en el agua que ingresaba al sistema de abastecimiento de agua potable de Des Moines alcanzaron 20,55 mg/L en el caso del río Raccoon y 17,15 mg/L en el del río Des Moines, lo que ejerció una enorme presión sobre la capacidad de tratamiento del agua y dio lugar a la primera prohibición de riego del césped jamás emitida en el país debido a los elevados niveles de nitrato.⁶¹

Los sistemas de agua públicos y comunitarios más pequeños experimentan violaciones más frecuentes del MCL de nitrato porque son más propensos a extraer agua de fuentes de agua subterránea, donde la contaminación por nitratos es más prevalente, y porque no pueden permitirse costosos esfuerzos de remediación, como actualizar la tecnología de tratamiento o cambiar su fuente de abastecimiento de agua.⁶² El costo de remediar la contaminación por nitratos hace que el agua sea más costosa para las comunidades y agrava la crisis de asequibilidad, especialmente para los residentes rurales abastecidos por sistemas de agua más pequeños.⁶³

COSTOS DE SOLUCIONES TEMPORALES Y PROVISIONALES PARA LOS ESTADOS Y HOGARES

Los distritos hídricos estatales y locales pueden financiar soluciones provisionales, como el suministro de agua embotellada o agua transportada a comunidades que experimentan contaminación por nitratos.⁶⁴ Sin embargo, estos costos “temporales” continuarán acumulándose y aumentando si no se abordan las causas raíz de la contaminación por nitratos. Incluso si se reduce la lixiviación de fertilizantes proveniente de las granjas, el nitrato puede tardar años en atravesar el suelo y llegar a los acuíferos

subterráneos, lo que significa que las comunidades y los hogares afectados podrían requerir suministros de agua complementarios durante décadas.⁶⁵

Por ejemplo, el agua potable contaminada con nitrato es un problema significativo en las regiones de la Costa Central y del Valle Central de California, especialmente para las comunidades desfavorecidas.⁶⁶ En 2019, la legislatura de California creó el Programa de Financiamiento Seguro y Asequible para la Equidad y la Resiliencia (Safe and Affordable Funding for Equity and Resilience, SAFER) para analizar y monitorear las tendencias de contaminación del agua potable y el Fondo de Agua Potable Segura y Asequible (Safe and Affordable Drinking Water, SADW) para financiar las soluciones. Entre 2019 y 2025, el estado gastó 182,3 millones de USD en suministros de agua provisionales, incluida el agua embotellada, para las comunidades abastecidas por sistemas de agua defectuosos.⁶⁷ Estos costos continuarán acumulándose hasta que el estado reduzca la contaminación por nitrógeno en su origen; a partir de 2025, 88 sistemas de agua en California no cumplirían con el MCL de nitrato.⁶⁸ Esta estimación no incluye el dinero que las familias pueden haber pagado de su bolsillo por el agua embotellada. Esto puede representar una suma considerable: por ejemplo, en la cuenca del lago Tulare, los hogares gastan aproximadamente 30 USD por mes en agua embotellada para consumo, además de su factura mensual de agua.⁶⁹

El alto costo de comprar agua embotellada de emergencia también genera dificultades a las comunidades del Medio Oeste. En el sudeste de Minnesota, la mayor fuente de contaminación del agua potable es la contaminación por nitrógeno de la agricultura.⁷⁰ Los hogares que dependen de pozos privados para el agua potable pueden gastar entre 530 USD y 1590 USD al año en agua embotellada debido a la escorrentía de nitrógeno de la agricultura.⁷¹ En Toledo, Ohio, en 2014 los hogares gastaron un total de 828 193 USD en agua embotellada durante tres días debido a una floración de algas nocivas causada, en parte, por la contaminación por nitrógeno de las actividades agrícolas.⁷²

COSTOS PARA LAS ECONOMÍAS PESQUERAS Y RECREATIVAS

El sector recreativo podría perder ingresos sustanciales debido a la contaminación por nitrógeno. Según la evaluación más reciente de la EPA sobre ríos y arroyos, el 44 por ciento de los ríos y arroyos del país están en mal estado debido a los elevados niveles de nitrógeno.⁷³ Cuando la calidad del agua es deficiente, el acceso a sitios o actividades de recreación puede verse restringido, e incluso si no es así, es probable que menos personas paguen las tarifas de acceso. La calidad del agua constantemente degradada genera pérdidas económicas significativas para las comunidades y los estados que dependen de los ingresos de actividades como la natación, la pesca y la navegación.⁷⁴ Según una estimación reciente, los daños económicos de la contaminación por nutrientes para la recreación en los Estados Unidos pueden alcanzar más de 45 mil millones de USD.⁷⁵

Los estados y las comunidades que dependen de pesquerías en buen estado para su seguridad económica también pueden sufrir pérdidas financieras debido a la contaminación por nitrógeno. La contaminación por nitrógeno que fluye por el

río Misisipi hacia el Golfo de México ha aumentado cinco veces en el último siglo y ha costado a las pesquerías y al hábitat marino del golfo entre 552 millones de USD y 2,4 mil millones de USD anuales.⁷⁶

COSTOS DE LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL

Los estados y las comunidades asumen directamente los costos de remediar los cuerpos de agua afectados por floraciones de algas nocivas o zonas muertas. En solo 10 años, 85 comunidades de los Estados Unidos gastaron más de 1,15 mil millones de USD para remediar las floraciones de algas.⁷⁷ Solo las ciudades y los pueblos de Minnesota, entre 2010 y 2020, gastaron 3 millones de USD para limpiar y proteger seis cuerpos de agua de estas floraciones.⁷⁸



© Mike Hooper/USGS

Las floraciones de algas nocivas pueden causar la mortandad de peces.

IV. LOS ESTATUTOS Y LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTES NO ALCANZAN PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO

Los Estados Unidos carecen de una estrategia unificada de reducción de nitrógeno. En cambio, una variedad de estatutos, autoridades y programas abordan distintos aspectos del problema, cada uno con sus propias limitaciones. Estos incluyen dos leyes nacionales fundamentales, la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act, CWA) y la Ley de Agua Potable Segura (Safe Drinking Water Act, SDWA), que establecen estándares para proteger las aguas superficiales y el agua potable.⁷⁹ En la práctica, la gestión del nitrógeno y las medidas de remediación pueden ser financiadas por la EPA o el Departamento de Agricultura de los EE. UU. (U.S. Department of Agriculture, USDA) mediante subvenciones estatales, mientras que el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Service, NRCS), los departamentos estatales de agricultura, las universidades públicas de investigación agrícola y las organizaciones no gubernamentales proporcionan información y recursos críticos para ayudar a los agricultores a limitar la pérdida de nitrógeno en su origen.

LOS NITRATOS SE FILTRAN MÁS ALLÁ DEL ALCANCE DE NUESTROS ESTATUTOS AMBIENTALES FEDERALES

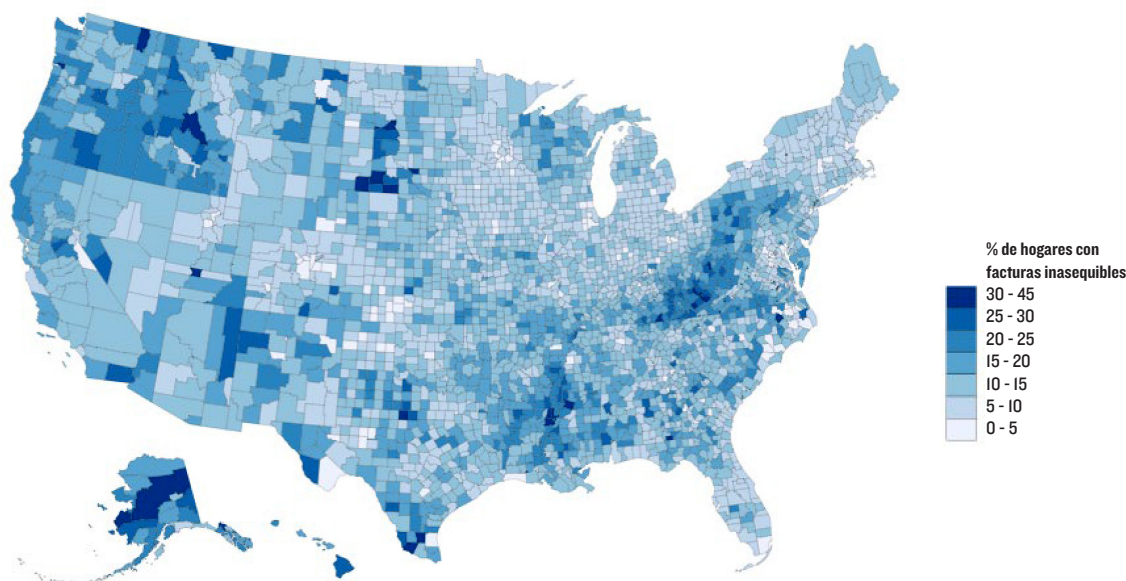
La CWA y la SDWA han ayudado a los Estados Unidos a lograr avances innovadores para proteger la calidad del agua y garantizar el acceso a agua potable limpia. Sin embargo, la CWA originalmente abordaba la contaminación de “fuente

puntual” (es decir, contaminación proveniente de una fuente única e identificable), principalmente de descargas industriales y aguas residuales municipales, y no ha sido eficaz para limitar la contaminación del agua proveniente de la agricultura.⁸⁰ En parte, esto se debe a que el Congreso decidió no aplicar requisitos obligatorios de reducción de contaminación a la mayoría de las descargas agrícolas.⁸¹ Un fallo de la Corte Suprema en el caso *Sackett v. EPA* de 2023 puede socavar la protección de los humedales establecida por la CWA, lo que pone aún más en riesgo a los lagos, ríos y arroyos que dependen de los humedales para reducir los flujos de nitratos.⁸²

La SDWA ha sido una herramienta poderosa para proteger el agua potable de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.⁸³ Sin embargo, la contaminación por nitratos en el grifo sigue amenazando a los estadounidenses de todos los sectores sociales. Si bien existen MCL para todos los contaminantes regulados, como los nitratos, y se requiere legalmente que se revisen y, si es necesario, se modifiquen para proteger la salud pública cada seis años, por lo general la EPA no actualiza los estándares. La EPA debía reevaluar el estándar de nitratos durante sus revisiones en 2003, 2010, 2017 y 2024.⁸⁴ La agencia no actualizó el estándar de nitratos en ninguna de esas revisiones; de hecho, el MCL de nitratos no se ha actualizado desde 1975. Este retraso de varias décadas es especialmente problemático, ya que las nuevas investigaciones sugieren que el umbral de 10 mg/L es demasiado alto para proteger a niños y adultos de problemas de salud.⁸⁵



FIGURA 4: PORCENTAJE ESTIMADO DE HOGARES, POR CONDADO, EN TODOS LOS ESTADOS UNIDOS CON FACTURAS DE AGUA INASEQUIBLES, DEFINIDAS COMO FACTURAS QUE SUPERAN EL 4,5 POR CIENTO DE LOS INGRESOS MENSUALES DEL HOGAR⁸⁶



Porcentaje estimado de hogares con facturas inasequibles en el umbral del 4,5 % (todos los condados)

Aun así, algunas comunidades en todos los Estados Unidos están empleando la SDWA para combatir la contaminación por nitratos proveniente de la agricultura. En Minnesota, Washington, Iowa y Oregón, las comunidades han utilizado la Sección 1431 de la SDWA para solicitar a la EPA que determine que los niveles de nitratos representan un peligro inminente y sustancial para la población.⁸⁷

La capacidad de los gobiernos locales y estatales para cumplir con sus compromisos de la CWA y la SDWA para protegerse contra el agua potable peligrosa depende en parte de flujos estables y saludables de recursos federales para inversiones públicas continuas.⁸⁸ Las comunidades rurales con una base fiscal limitada (consulte la figura 4) están en la peor posición para proteger su agua potable de los nitratos sin financiamiento federal.⁸⁹ Si bien hemos estado logrando avances en la protección del agua limpia como nación en general, las inversiones federales en infraestructura de agua limpia han estado disminuyendo; a partir de 2023, los estados y los gobiernos locales estaban afrontando el 92 por ciento de los costos de la infraestructura hídrica.⁹⁰

LOS PROGRAMAS FEDERALES DE CONSERVACIÓN EXISTENTES NO CUENTAN CON FONDOS NI CON PERSONAL SUFICIENTES

Otra herramienta para abordar la crisis de contaminación por nitrógeno es el conjunto de programas voluntarios de conservación financiados por el USDA. El Título de Conservación de la Ley Agrícola (Título II) proporciona reembolsos de costos compartidos a los agricultores que utilizan prácticas que mejoran la gestión de nutrientes y reducen la escorrentía de nitrógeno. El Programa de Incentivos de Calidad Ambiental (Environmental Quality Incentives Program, EQIP) proporciona reembolsos de costos compartidos a los agricultores que conservan el suelo, protegen la calidad del

agua e implementan prácticas de conservación específicas, como los cultivos de cobertura o la planificación de la gestión de nutrientes.⁹¹ El Programa de Administración de la Conservación (Conservation Stewardship Program, CSP) les paga a los agricultores para mantener y expandir sus prácticas de conservación existentes, por ejemplo, al continuar utilizando cultivos de cobertura, pero cambiar a mezclas de cultivos de cobertura de múltiples especies o al reducir la labranza como parte de su estrategia de gestión de cultivos de cobertura y cultivos comerciales.

Estos programas ofrecen flexibilidad para que los productores experimenten con cambios e incorporen nuevas prácticas de conservación en el campo para reducir la cantidad de nitrógeno que se aplica y pierde. Tanto EQIP como CSP pueden utilizarse para financiar una amplia variedad de planes de conservación que pueden ayudar a los productores a trazar un camino hacia el uso reducido de nitrógeno, a menudo con la ayuda de un proveedor de servicios técnicos certificado. Además, el Programa de Servidumbres para la Conservación Agrícola (Agricultural Conservation Easement Program, ACEP) ayuda a los propietarios de tierras a mantener la tierra en uso agrícola y preservar los humedales, que funcionan como los “riñones de la naturaleza” y reducen la entrada de contaminación por nitrógeno en los suministros de agua.⁹²

Estos programas centrales de conservación del USDA son beneficiosos para reducir la contaminación por nitrógeno y proteger la calidad del agua, pero reciben más solicitudes de las que pueden atender y su financiación es crónicamente insuficiente.⁹³ La Ley de Reducción de la Inflación (Inflation Reduction Act, IRA) se diseñó parcialmente para aliviar los déficits presupuestarios de los programas voluntarios de conservación con su inversión histórica de 20 mil millones de USD en programas de conservación. Lamentablemente, los fondos de la IRA que se habían prometido contractualmente

a los productores se suspendieron en 2025, dejando a muchos agricultores a mitad de la instalación de prácticas de conservación, con gastos importantes ya realizados y perspectivas de reembolso inciertas.⁹⁴ Luego, el Congreso desechó el financiamiento climático exclusivo de la IRA para la agricultura de conservación, aunque sí asignó esos dólares a los programas regulares de conservación de la ley agrícola. Sin embargo, dado que el USDA perdió casi 21 000 empleados solo en 2025, y con fondos congelados para asistencia técnica, los agricultores que intentan implementar prácticas de reducción de nitrógeno enfrentan muchos obstáculos.⁹⁵

Los agricultores se encuentran en una situación muy difícil. Si bien los programas federales diseñados para ayudarlos a mejorar la salud del suelo y disminuir la contaminación por nitrógeno no cuentan con fondos suficientes, al mismo tiempo se les ofrece una variedad de incentivos a través del seguro de cultivos, los programas de productos básicos del Título I y otros programas para maximizar la producción de maíz y soja con más aplicación de nitrógeno, independientemente de la demanda real del mercado.⁹⁶

LA ASISTENCIA TÉCNICA ESTÁ SUBVALORADA Y CARECE DE FINANCIACIÓN SUFICIENTE

La financiación federal para la agricultura de conservación también presenta una importante deficiencia: estos complejos programas de subvenciones no proporcionan fondos suficientes para la asistencia técnica ni el apoyo necesario para gestionarlos. La asistencia técnica se financia anualmente y está

constantemente en la mira de recortes presupuestarios.⁹⁷ Sin una financiación pública consistente y predecible para la asistencia técnica, los agricultores pueden verse obligados a buscar asesoramiento de minoristas privados, cuyos incentivos están orientados a vender más productos, incluidos más fertilizantes, y no a reducir los daños ambientales. Muchos agricultores están listos y dispuestos a adoptar prácticas de conservación que reduzcan el nitrógeno por su cuenta sin asistencia financiera, pero podrían beneficiarse de algunos consejos técnicos sobre cómo podrían funcionar dichas prácticas. La financiación estable de la asistencia técnica para la conservación, proveniente de las asignaciones presupuestarias anuales para la agricultura (y, en ocasiones, de fuentes de financiación obligatoria como la IRA), es importante para garantizar que los agricultores puedan convertir estos programas en mejoras exitosas en sus granjas.⁹⁸

Además, las agencias federales están muy rezagadas con respecto al sector privado cuando se trata de remunerar a los profesionales con calificaciones técnicas. El bajo salario de estos proveedores de servicios técnicos dificulta la contratación y la retención.⁹⁹

En resumen, los programas federales voluntarios de conservación agrícola son una pieza fundamental del rompecabezas porque ayudan a los agricultores a integrar los distintos elementos necesarios para implementar prácticas que reduzcan la contaminación por nitrógeno y disminuyan la necesidad de insumos agrícolas. Sin embargo, no son suficientes por sí solos para reducir significativamente la contaminación por nitrógeno.



V. MINNESOTA Y CALIFORNIA EVIDENCIAN LA NECESIDAD DE CONTAR CON UNA GESTIÓN ESTATAL SÓLIDA Y RIGUROSA

Los estados también carecen de estrategias eficaces contra la contaminación por nitrógeno, como se ejemplifica en los siguientes estudios de caso. Estos dependen principalmente de programas voluntarios para gestionar la contaminación por nitrógeno de las tierras de cultivo al igual que el gobierno federal. Sin embargo, incluso a nivel estatal, este enfoque no ha logrado garantizar agua de calidad para las personas y los ecosistemas durante los últimos 40 años. Al establecer límites cuantitativos en las aplicaciones y descargas de fertilizantes con nitrógeno y, al mismo tiempo, apoyar a los agricultores mediante prácticas sostenibles de gestión del nitrógeno, los estados pueden fortalecer los programas existentes e impulsar reducciones significativas en la contaminación por nitrógeno.

ESTUDIO DE CASO: MINNESOTA

ANTECEDENTES

La contaminación por nitrógeno en Minnesota ha sido un problema creciente desde la década de 1980, cuando las agencias federales y estatales identificaron por primera vez el aumento de la contaminación por nitratos en las aguas superficiales y subterráneas de Minnesota.¹⁰⁰ El setenta y dos por ciento de todo el exceso de nitrógeno en los ríos del estado proviene de la agricultura, específicamente de la aplicación excesiva de fertilizantes sintéticos y estiércol.¹⁰¹ De hecho, el fertilizante sintético representa el 47 por ciento de todo el nitrógeno agregado a las tierras de cultivo en Minnesota, mientras que la fijación por leguminosas, la aplicación de estiércol en los campos

y la deposición atmosférica aportan cantidades menores, aunque significativas. Como resultado de esta contaminación, muchos habitantes de Minnesota están expuestos regularmente a niveles elevados de nitrato, y uno de cada ocho depende de sistemas públicos de agua subterránea que exceden el límite federal y estatal (10 mg/L) para el nitrato.¹⁰² Esta cifra casi seguramente aumenta cuando se incluyen los 1,1 millones de habitantes de Minnesota que dependen de pozos privados de agua potable.¹⁰³ En todo el estado, alrededor del 1 por ciento de los 5000 pozos privados evaluados anualmente tienen niveles de nitrato que exceden el MCL; en áreas vulnerables a la contaminación de aguas subterráneas, este número supera el 10 por ciento.¹⁰⁴

La región cárstica del sudeste de Minnesota, que se encuentra sobre rocas particularmente porosas propensas a una rápida infiltración de agua, enfrenta niveles especialmente alarmantes de agua subterránea contaminada con nitrato. Muchos residentes locales ahora dependen de fuentes de agua potable poco saludables y potencialmente peligrosas debido a una combinación de esta geología vulnerable, una gran cantidad de establecimientos de producción animal donde la contaminación fluye hacia las vías fluviales circundantes y la transición desde una producción diversificada de cereales de grano pequeño, que podría haber ayudado a mitigar la contaminación por nitrógeno, hacia monocultivos de maíz y soja con alto contenido de nitrógeno.¹⁰⁵

En 2017, el 19 por ciento de los pozos en el condado de Winona presentaron resultados por encima de 10 mg/L, y la mitad de los pozos en el municipio de Fremont presentaron resultados por encima de este límite.¹⁰⁶ Como se mencionó anteriormente, las



© Lance Cheung/USDA

investigaciones más recientes indican que ciertos tipos de cáncer y defectos congénitos están relacionados con el consumo de agua contaminada con un nivel de nitrato de 5 mg/L o superior.¹⁰⁷

En un estado con más de 10 000 lagos, la contaminación de las aguas superficiales por nitrógeno representa riesgos significativos para la biodiversidad y las economías pesqueras. Los nitratos que fluyen a través de las vías fluviales del norte del estado contribuyen a graves floraciones de algas y a la sobrecarga de nutrientes en la cuenca del lago Winnipeg.¹⁰⁸ La Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota (Minnesota Pollution Control Agency) concluyó que los niveles de nitrato de tan solo 5 mg/L no son seguros para la vida acuática, pero no ha adoptado un estándar de calidad del agua basado en esta conclusión.¹⁰⁹ Un informe de 2013 indicó que estos límites se exceden rutinariamente en el estado, con el 41 por ciento de todos los ríos y arroyos analizados que superan los 5 mg/L y el 27 por ciento que superan los 10 mg/L.¹¹⁰

Los daños de la contaminación por nitrógeno también se extienden más allá de los límites estatales. Como se señaló anteriormente, el agua contaminada fluye por el río Misisipi y contribuye a la zona muerta anual en el Golfo de México, un área del tamaño de Connecticut donde las condiciones de bajo contenido de oxígeno dificultan la supervivencia de la fauna marina.¹¹¹ Esta zona hipóxica causa hasta 2,4 mil millones de USD en daños a la pesca y la vida marina cada año, y los esfuerzos para disminuir su tamaño no han sido satisfactorios.¹¹²

Las redes de tuberías subterráneas diseñadas para aumentar el drenaje de agua en las tierras de cultivo (conocido como “drenaje subterráneo”) contribuyen a la crisis de contaminación por nitrógeno en Minnesota. Esta infraestructura subterránea altera el flujo de agua en el suelo, da como resultado mayores cargas de nitrato en los arroyos vecinos y es la mayor fuente de contaminación por nitrógeno en las aguas superficiales.¹¹³ Aproximadamente el 35 por ciento de las tierras de cultivo en Minnesota cuentan con sistemas de drenaje subterráneo, con una superficie en expansión en los últimos 15 años.¹¹⁴ Menos del 1 por ciento de esta superficie ha implementado prácticas controladas de gestión de drenaje diseñadas para ralentizar el flujo de agua de estas áreas muy drenadas o tratar la escorrentía de drenaje para reducir la carga de nutrientes.¹¹⁵ El uso de drenaje subterráneo es frecuente en áreas que ya son propensas a la contaminación de aguas subterráneas debido a factores geológicos, lo que aumenta la probabilidad de niveles elevados de nitrato en el agua potable.

La aplicación excesiva de fertilizantes también impulsa las emisiones de óxido nitroso en Minnesota. En 2023, la aplicación excesiva de fertilizantes sintéticos en el estado produjo emisiones de gases de efecto invernadero evitables equivalentes a las de entre 400 000 y 700 000 automóviles a gasolina circulando durante un año.¹¹⁶ Las emisiones de óxido nitroso de la contaminación por nitrógeno pueden aumentar aún más con las temporadas de cultivo más largas y el potencial de eventos climáticos extremos asociados al calentamiento del clima.¹¹⁷

LOS ESFUERZOS VOLUNTARIOS PARA GESTIONAR LA CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO NO HAN FUNCIONADO EN MINNESOTA

Minnesota intentó por primera vez abordar la contaminación por nitrógeno con la Ley de Protección de Aguas Subterráneas en 1989, que instruyó al Departamento de Agricultura de Minnesota a limitar la contaminación de las aguas subterráneas debido a la aplicación excesiva de fertilizantes sintéticos.¹¹⁸ La ley dio lugar a programas voluntarios enfocados en establecer las mejores prácticas de gestión y ampliar la educación y el acceso a pruebas de pozos privados para detectar contaminación por nitratos.

Estas intervenciones tuvieron un impacto mínimo. En la actualidad, los niveles de nitrato en todo el estado continúan superando regularmente el MCL.¹¹⁹ En 2014, la Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota estableció un objetivo a largo plazo de reducir la contaminación por nitrógeno en el estado en un 45 por ciento para 2040, con un objetivo de reducción del 20 por ciento para 2025.¹²⁰ Para 2025, la contaminación por nitrógeno en todo el estado había disminuido en solo un 6 a 9 por ciento, dependiendo de la cuenca hidrográfica.¹²¹ La mayoría de estas reducciones provienen de fuentes no agrícolas, como mejoras en el tratamiento de aguas residuales; casi todas las reducciones restantes deberán provenir del sector agrícola.¹²²

Los datos del estado también muestran que desde 2014, más de 1,6 millones de hectáreas de tierra (aproximadamente el 18 por ciento del total de tierras de cultivo en el estado) se han sometido voluntariamente a nuevas prácticas de reducción de nitrógeno adoptadas a través de programas gubernamentales. Sin embargo, esta adopción limitada de las mejores prácticas de gestión solo ha dado como resultado una reducción de entre el 4 y el 5 por ciento en las cargas de nitrógeno a nivel de cuenca hidrográfica con respecto a los valores de referencia de 2014.¹²³

Estos resultados muestran que los esfuerzos voluntarios por sí solos son insuficientes para limitar la contaminación por nitrógeno, tanto porque la mayoría de las mejores prácticas de gestión recomendadas no abordan el problema de la aplicación excesiva en sí, como porque no se están adoptando a una escala suficiente para proteger la calidad del agua.¹²⁴ A pesar de esto, Minnesota sigue centrando sus esfuerzos principalmente en estos programas voluntarios como el enfoque principal para la reducción de la contaminación por nitrógeno.

Mientras tanto, en la raíz del problema, el fertilizante nitrogenado y el estiércol aplicados como fuente de nitrógeno a las tierras de cultivo en Minnesota superan las tasas recomendadas en un 18 por ciento en promedio.¹²⁵ Esto significa que en estados como Minnesota, existe un amplio margen para reducir las tasas de aplicación sin afectar los rendimientos de los cultivos. Además, la evidencia sugiere que una gestión más inteligente de los fertilizantes combinada con las mejores prácticas de gestión podría reducir drásticamente la contaminación por nitrógeno.¹²⁶



Se necesitan reducciones en el nitrógeno tanto del estiércol como del fertilizante sintético para proteger la calidad del agua en Minnesota.

ESTUDIO DE CASO: CALIFORNIA

ANTECEDENTES

El exceso de fertilizantes nitrogenados ha sido una importante fuente de contaminación en California durante 70 años.¹²⁷ En un informe de 1988 preparado para la legislatura estatal, la Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos descubrió que un número creciente de fuentes de agua potable excedían el MCL de nitratos.¹²⁸ El informe recomendó que la Junta Estatal del Agua (State Water Board) centralizara la recopilación de datos de nitratos y explorara medidas regulatorias, incluida la limitación de las aplicaciones de fertilizantes en áreas vulnerables para abordar la contaminación por nitrógeno.¹²⁹ Sin embargo, la Junta Estatal del Agua no tomó ninguna medida regulatoria y, en cambio, continuó permitiendo que las operaciones agrícolas descargaran contaminantes nitrogenados en las vías fluviales sin ninguna restricción.¹³⁰

En 1999, la legislatura de California aprobó el Proyecto de Ley del Senado 390 (SB 390), que ordenó a la Junta Estatal del Agua que cesara su otorgamiento incondicional de permisos y regulara las descargas agrícolas, incluida la contaminación por nitrógeno.¹³¹ Poco después de la aprobación de la SB 390, la junta creó el Programa Regulador de Tierras Irrigadas (Irrigated Lands Regulatory Program, ILRP) para proteger la calidad del agua al reducir la contaminación por nitrógeno de las tierras de cultivo irrigadas.¹³² Sin embargo, el programa regulatorio consiste solo en la recopilación de datos y no establece límites cuantitativos ni máximos para la aplicación o las descargas de nitrógeno.

Como era de esperar, la contaminación por nitrógeno continúa dañando a las comunidades y los ecosistemas, y está aumentando en algunas partes del estado.¹³³ En la región de la Costa Central, 14 039 residentes recibieron agua de sistemas que excedieron el MCL de nitratos en 2025.¹³⁴ En el Valle de San Joaquín, entre 2003 y 2017, aproximadamente 1,5 millones de personas recibieron agua potable de sistemas que se evaluaron en el MCL o por encima de este.¹³⁵

ESFUERZOS DE RECOPIACIÓN DE DATOS DE CALIFORNIA

A pesar de los desafíos continuos para reducir la contaminación por nutrientes, los requisitos de presentación de informes del ILRP ofrecen un punto de partida para la presentación de informes de datos de fertilizantes nitrogenados que pueden ayudar a guiar e informar a otros estados. La Junta Estatal del Agua establece los requisitos básicos para el ILRP que cada una de las nueve juntas regionales puede adaptar de acuerdo con las condiciones de cultivo, la hidrología y los tipos de cultivos de cada región.¹³⁶ Esta flexibilidad ha dado como resultado una calidad de datos variable, estándares de informes variables y una imagen fragmentada de la contaminación por nitrógeno en California.

La Junta Estatal del Agua emitió en 2018 una Resolución sobre la calidad del agua con carácter precedente para mejorar el ILRP, incluida la incorporación de nuevos requisitos de presentación de datos.¹³⁷ La resolución de 2018 exige que los agricultores informen, entre otras cosas, sus aplicaciones de fertilizantes, remociones de nitrógeno, cultivos sembrados, rendimientos proyectados, volumen de agua de riego aplicada y superficie cultivada. Lamentablemente, debido a cierta variación regional en los ILRP, no todos los datos informados por los agricultores se comparten con la Junta Estatal del Agua ni con el público, en particular los datos de superficie cultivada.

En al menos un ILRP de una junta regional del agua, los agricultores informan los valores de superficie cultivada a nivel de parcela, pero estos valores se eliminan antes de presentarse a la Junta Estatal del Agua y a las juntas regionales del agua por motivos de privacidad.¹³⁸ Esto socava la capacidad de la Junta Estatal del Agua para identificar granjas que están aplicando nitrógeno en exceso, porque es imposible determinar si esas aplicaciones excesivas o descargas contaminantes superan los límites permitidos sin saber sobre cuántas hectáreas se están produciendo. Por ejemplo, una descarga de 56 kilogramos de nitrógeno por hectárea sobre una superficie de 4 hectáreas (lo que supone una pérdida potencial de 227 kilogramos de nitrógeno) tiene implicaciones para la salud pública, el

© David Kosling/USDA



medioambiente y las políticas públicas muy diferentes a las de esa misma descarga sobre 405 hectáreas (lo que supondría una pérdida potencial de 22 680 kilogramos de nitrógeno).

Si se pusieran a disposición datos de superficie a nivel de parcela, los datos de estos informes podrían revelar la escala de aplicaciones excesivas de fertilizantes en California y determinar qué sistemas de cultivo son los principales responsables de la contaminación por nitrógeno. Los datos también podrían ayudar a los reguladores que cuentan con recursos limitados a dirigir de manera eficiente la divulgación y la educación a los agricultores que constantemente están aplicando fertilizantes nitrogenados en exceso. Además, los datos podrían permitir a los organismos reguladores diseñar regulaciones más precisas y medir el impacto de esas regulaciones, lo que podría ayudar a generar confianza a largo plazo en el programa.¹³⁹

EL SURGIMIENTO Y LA DEVOLUCIÓN PARA NUEVA REVISIÓN DE LA ORDEN AGRÍCOLA 4.0

Para 2021, una de las juntas regionales del agua, la Junta de Control de Calidad del Agua de la Costa Central, observó que simplemente exigir a los agricultores que informaran su aplicación de nitrógeno no estaba reduciendo la contaminación por nitrógeno.¹⁴⁰ De hecho, la calidad del agua en algunas partes de la región continuaba empeorando. La experiencia de la Junta de la Costa Central es consistente con el punto de vista de que las medidas voluntarias y no cuantitativas para reducir la contaminación por nitrógeno son insuficientes por sí solas para proteger la calidad del agua.¹⁴¹

En respuesta, la Junta de la Costa Central emitió la Orden Agrícola 4.0, una regulación que habría establecido límites numéricos y objetivos para las aplicaciones y descargas de fertilizantes nitrogenados.

La orden se diseñó para reducir la contaminación por nitrógeno durante un período de 28 años para que, en última instancia, el uso de nitrógeno fuera compatible con los umbrales de calidad del agua potable segura.¹⁴²

Habría sido la primera regulación en establecer límites cuantitativos a las aplicaciones y descargas generales de nitrógeno en los Estados Unidos. La Junta Estatal del Agua devolvió la orden para su revisión antes de que tuviera la oportunidad de entrar plenamente en vigor.

Los límites iniciales en la Orden Agrícola 4.0 estaban dirigidos a los productores que aplicaban fertilizante nitrogenado en niveles muy superiores a las tasas recomendadas, lo que significa que la mayoría de los agricultores ya habría cumplido. Según el panel de informe de datos de nitrógeno de la Junta de la Costa Central, solo el 3 por ciento de los agricultores que reportaron sus datos de nitrógeno en 2021 habrían tenido que cambiar su comportamiento para cumplir el primer objetivo de descarga de nitrógeno de 560,43 kg por hectárea.¹⁴³

La Orden Agrícola 4.0 también habría recompensado a los agricultores por utilizar prácticas sostenibles de gestión del nitrógeno, como plantar cultivos de cobertura o utilizar compost. Curiosamente, sobre la base de evidencia anecdótica de investigadores locales, los límites cuantitativos en la Orden Agrícola 4.0, combinados con las recompensas por prácticas sostenibles de gestión del nitrógeno, llevaron a más agricultores a experimentar con cultivos de cobertura, enmiendas orgánicas y compost antes de que la orden fuera devuelta para su revisión.¹⁴⁴ La regulación impulsó la adopción de prácticas sostenibles de gestión del nitrógeno.

La Junta Estatal del Agua dejó de lado los límites cuantitativos en la Orden Agrícola 4.0, alegando que la Junta de la Costa Central había violado una orden anterior emitida por la Junta Estatal del Agua.¹⁴⁵ Hasta 2025, la Junta Estatal del Agua no había implementado ningún límite cuantitativo a la aplicación y descarga de nitrógeno. En cambio, las agencias estatales siguen priorizando los informes, la asistencia técnica y la educación, que por sí solos no han resuelto la crisis de contaminación por nitrógeno.



Una floración de algas nocivas en el embalse San Luis, en California.

VI. LOS ESTÁNDARES EXIGIBLES AYUDARÁN A RESOLVER LA CRISIS DE CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO

La clave para resolver la crisis de contaminación por nitrógeno radica en *estándares exigibles* en todo el estado para reforzar el impacto del cumplimiento voluntario. Esto es cierto tanto para limitar la escorrentía de nitrógeno como para reducir las emisiones de óxido nitroso. El marco de políticas descrito a continuación y resumido en la tabla 1 abarca límites claros y medibles que alinean los incentivos con los resultados, invierte en datos e infraestructura que monitorean el desempeño y prioriza la aplicación de la ley contra los valores atípicos para crear condiciones equitativas para todos los agricultores.

TABLA 1: UN MARCO DE POLÍTICAS QUE COMBINA LÍMITES CUANTITATIVOS CLAROS CON INFORMES PARA LOGRAR REDUCCIONES EN LA CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO

Establecer límites claros y medibles	Los estados deben establecer límites cuantitativos para la aplicación y descarga de nitrógeno, diseñados para proteger el agua potable y los ecosistemas. Los límites obligatorios evitan desventajas competitivas para los agricultores que ya emplean prácticas agrícolas sostenibles. Los límites claros impulsarán una mayor expansión de las prácticas agrícolas sostenibles y el desarrollo de tecnologías de fertilizantes más avanzadas.
Mejorar la medición y la generación de informes	El progreso debe seguirse mediante informes y monitoreo transparentes tanto a nivel de explotación agrícola y regional. Los planes de gestión del nitrógeno deben incluir datos sobre las tasas de aplicación y las necesidades de los cultivos, con mecanismos alternativos de informe que consideren las circunstancias únicas de las granjas pequeñas y diversificadas. Los minoristas de fertilizantes y las empresas de alimentos deben compartir la responsabilidad con los agricultores al preparar y ejecutar los planes.
Recompensar a los agricultores por utilizar prácticas sostenibles de gestión del nitrógeno	Las regulaciones deben impulsar las transiciones hacia sistemas agrícolas más sostenibles. Las políticas deben recompensar y promover prácticas como los cultivos de cobertura, las rotaciones de cultivos, la diversificación de cultivos, las franjas de protección ribereñas y el compostaje, que reducen la contaminación por nitrógeno y mejoran la productividad agrícola.
Complementar cumplimiento normativo con apoyo	Las regulaciones deben complementarse con asistencia técnica y capacitación para ayudar a los agricultores a cumplir con los límites sin imponer cargas excesivas y preservando al mismo tiempo la rentabilidad. El cumplimiento normativo debería comenzar con acciones de divulgación y acompañamiento, reservando las sanciones para los casos de incumplimiento.
Establecer MMRV para los objetivos climáticos	Desarrollar sistemas sólidos para medir, monitorear, informar y verificar (measure, monitor, report, and verify, MMRV) las emisiones de óxido nitroso y las reducciones provenientes de las granjas. Esto garantiza la transparencia, recompensa a los agricultores por las mejoras y respalda los objetivos climáticos.

LOS ESTÁNDARES EXIGIBLES SON CLAVE PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO

Sería maravilloso si pudiéramos hacer esto voluntariamente, pero no conozco ninguna sociedad en la historia de la humanidad que realmente haya protegido nuestro capital natural sin algún nivel de regulación exigible.

—Un granjero de Iowa en un evento de calidad del agua de agosto de 2025.¹⁴⁶

Los legisladores estatales deben establecer objetivos claros que garanticen que la escorrentía de nitrógeno de las granjas no contribuya a violaciones de los estándares de agua potable ni de los objetivos de calidad del agua para aguas superficiales o subterráneas. Dichos objetivos podrían implementarse mediante límites regulatorios exigibles sobre la aplicación excesiva y la descarga de nitrógeno de las tierras de cultivo, lo que podría requerir la implementación de mejores prácticas de gestión e incorporar la orientación de universidades públicas de investigación agrícola.

Para que se alcancen dichos objetivos y límites, deben ser medibles, verificables mediante informes y exigibles. La mensurabilidad es fundamental porque es poco probable que los gobiernos y la industria solucionen un problema que no están midiendo y que no están obligados a medir. La medición adecuada debe incluir el monitoreo y la presentación de informes basados en resultados, incluido informar sobre el nitrógeno aplicado y el nitrógeno eliminado como biomasa de cada hectárea de tierra de cultivo.¹⁴⁷ Dichos informes permiten a los funcionarios estatales trabajar con agricultores y empresas de fertilizantes para enfocar las estrategias de gestión del nitrógeno en las áreas de mayor necesidad, incluida la realización de actividades de divulgación y el aumento de la inscripción en programas voluntarios y basados en incentivos. Los informes precisos también permiten a los funcionarios estatales estimar las reducciones en la contaminación por nitrógeno sin depender únicamente de las concentraciones de nitrato en los pozos, lo que puede tardar décadas en reflejar cambios en la descarga de nitrógeno.¹⁴⁸ Los estados no deben depender únicamente de sistemas indirectos (“proxy”) que simplemente estiman la reducción de la contaminación por nitrógeno en función de la cantidad de hectáreas bajo las mejores prácticas de gestión.¹⁴⁹ En cambio, los informes deben centrarse en el progreso medible hacia la reducción de nitrógeno y los objetivos de calidad del agua. Al mismo tiempo, los programas de informes deben evitar un enfoque único para todos los casos y contar con mecanismos alternativos de informes que tengan en cuenta las circunstancias únicas de las granjas pequeñas y diversificadas.

En la práctica, los informes podrían lograrse mediante la presentación de planes de gestión de nitrógeno o de nutrientes. Dichos informes y los planes asociados deben tener en cuenta matices como el tipo de suelo y el nitrógeno existente en el suelo, así como el nitrógeno aplicado a través de fuentes no fertilizantes, como el agua de riego rica en nitratos. Los informes también deben incluir la adecuada “verificación sobre el terreno” mediante análisis de suelo o pruebas de calidad del agua de la escorrentía agrícola y de las aguas subterráneas y superficiales adyacentes. Otros enfoques de verificación sobre el terreno y verificación podrían incluir el cotejo de la información de los datos de aplicación de fertilizantes con los datos de ventas de fertilizantes, y la certificación de los datos por un consultor independiente.

La exigibilidad es fundamental porque la evidencia muestra que los programas voluntarios no han abordado suficientemente la crisis de contaminación por nitrógeno, dado que no abordan el núcleo del problema: la aplicación excesiva de fertilizante nitrogenado y el uso limitado de prácticas que minimizan la escorrentía de nitrógeno. Un sistema regulatorio efectivo incluirá límites cuantitativos tanto a la aplicación como a la descarga de nitrógeno de las tierras de cultivo y proporcionará vías alternativas de cumplimiento que tengan en cuenta el tipo de cultivo, las condiciones del suelo, las variaciones estacionales y el tamaño de la granja. Dichos límites pueden lograrse mediante planes de gestión del nitrógeno que permitan un proceso iterativo y colaborativo entre agricultores, empresas de fertilizantes o consultores, empresas de alimentos y funcionarios estatales o locales. El ILRP de California, analizado en la Sección V, proporciona un ejemplo del tipo de información que debe incluirse en dichos planes. De manera similar a las directivas existentes sobre contaminación climática, las regulaciones también podrían exigir que las empresas de alimentos hagan seguimiento y mitiguen la contaminación por nitrógeno en sus cadenas de suministro.¹⁵⁰ Los límites regulatorios deben combinarse con otras políticas para limitar la contaminación por nitratos, como los sistemas de permisos para el drenaje subterráneo en jurisdicciones como Minnesota que utilizan dicha infraestructura.¹⁵¹

Los funcionarios estatales que implementen límites a la aplicación excesiva y descarga de nitrógeno deben evitar enfoques punitivos de cumplimiento y, en cambio, adoptar un enfoque progresivo de cumplimiento que comience con un aviso claro de las infracciones, junto con capacitación y actividades de divulgación. Esto brinda a los agricultores oportunidades para mejorar sus prácticas de gestión del nitrógeno sin enfrentar sanciones financieras significativas e inmediatas. Las multas sustanciales o sanciones civiles deben imponerse solo si los agricultores se niegan a tomar medidas para mejorar sus prácticas de gestión del nitrógeno o incorporar las acciones recomendadas.

Los límites exigibles a la aplicación y descarga de nitrógeno también deben combinarse con sólidos programas voluntarios y basados en incentivos para mejorar la gestión del nitrógeno, particularmente para granjas pequeñas y diversificadas. Los programas podrían fomentar la diversificación de cultivos, los cultivos de cobertura o la rotación con cultivos fijadores de nitrógeno, como las legumbres. El drenaje de conservación o las prácticas de borde de campo, como el uso de franjas de protección ribereñas, franjas de protección saturadas, humedales de tratamiento y biorreactores, reducen el nitrógeno en la escorrentía antes de que ingrese a los arroyos o al agua

subterránea y debería incentivarse su implementación. Esto debe combinarse con un sólido programa de monitoreo de óxido nitroso para captar posibles aumentos en las emisiones asociadas con algunos tipos de franjas de protección.¹⁵²

Las soluciones de política también deben reconocer que las empresas de fertilizantes y otros actores a lo largo de la cadena de suministro de alimentos son importantes impulsores del uso excesivo de nitrógeno; los incentivos u obligaciones de cumplimiento deben alinearse en consecuencia.¹⁵³ Como se analiza en el apéndice de este informe, los minoristas de fertilizantes son vistos por los agricultores como una fuente confiable de información sobre gestión del nitrógeno, aunque tienen un interés financiero en vender fertilizantes y maximizar las ganancias. Las políticas podrían exigir que los minoristas de fertilizantes, las empresas de alimentos o sus consultores compartan la responsabilidad con los agricultores en el desarrollo y la implementación de planes de gestión del nitrógeno o de nutrientes, el cumplimiento de los límites sobre la aplicación excesiva y descarga, y la verificación sobre el terreno de la exactitud de la información en dichos planes. Además, las empresas de fertilizantes y de alimentos también podrían estar sujetas a medidas de cumplimiento progresivas por negarse a cumplir con dichos requisitos.

LOS ESTÁNDARES EXIGIBLES SON EQUITATIVOS

Los estándares exigibles pueden ayudar a establecer un terreno de juego parejo y equitativo para la industria agrícola. Actualmente, los agricultores que invierten en mejores prácticas de gestión voluntarias para reducir la contaminación por nitrógeno a menudo deben competir con agricultores que se niegan a hacerlo. Un agricultor que emplea mejores prácticas de gestión podría asumir costos de producción más altos que quizás no se compensen con las ventas. Mientras la reducción de nitrógeno sea opcional, algunos agricultores seguirán enfrentando presión para aplicar nitrógeno en exceso a fin de reducir el riesgo percibido o real y mantener la rentabilidad, incluso si eso pone en peligro a sus comunidades y degrada su entorno. Este principio se aplica en la mayoría de las demás industrias: una planta de fabricación está sujeta a las mismas regulaciones de control de la contaminación que otras en el mismo mercado. Sin regulaciones consistentes, algunos fabricantes podrían no emplear tecnologías de control de la contaminación y potencialmente aumentar las ventas o las ganancias, incluso mientras perjudican a la comunidad circundante.

Los estándares exigibles garantizarán que todos los agricultores se rijan por las mismas reglas y compartan la responsabilidad de reducir las externalidades negativas. Los estándares exigibles también son fundamentales porque, incluso si la mayoría de los agricultores está invirtiendo en estrategias para minimizar la contaminación por nitrógeno, quienes no lo hacen aún pueden ser un importante impulsor de la contaminación.

LOS ESTÁNDARES EXIGIBLES INCENTIVAN LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

Los estándares exigibles pueden impulsar la innovación en tecnologías de fertilizantes y prácticas de riego. Sin la demanda de tecnologías avanzadas que generarían estos estándares, las empresas de fertilizantes carecen de incentivos adecuados para desarrollarlas.

Estas tecnologías incluyen fertilizantes de eficiencia mejorada (Enhanced Efficiency Fertilizer, EEF), que tienen como objetivo mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno para minimizar la pérdida de nitrógeno.¹⁵⁴ Una posibilidad es que los funcionarios estatales podrían exigir que los minoristas de fertilizantes vendan un mayor porcentaje de EEF para cierta fecha, y esa cifra seguiría aumentando hasta que la gran mayoría de las ventas de fertilizantes sean EEF, de manera similar a las normas de Economía de Combustible Promedio Corporativo que aumentaron la eficiencia de combustible de los automóviles.¹⁵⁵ Otras leyes ambientales han cumplido una función de impulso tecnológico; por ejemplo, la Ley Federal de Agua Limpia exige que la EPA establezca limitaciones sobre las descargas basadas en la tecnología y está destinada a fomentar el desarrollo de tecnologías nuevas, más eficientes y más efectivas.¹⁵⁶

Si bien los EEF tienen el potencial de desempeñar un papel importante en la reducción de la contaminación por nitrógeno, no son una solución milagrosa.¹⁵⁷ Actualmente, existen varios tipos de EEF (p. ej., inhibidores de nitrificación, fertilizantes de liberación lenta), y no está claro qué tan bien reducen la pérdida de nitrógeno en diferentes climas, condiciones meteorológicas y sistemas de cultivo. Los EEF deben diseñarse y regularse adecuadamente para garantizar que no tengan consecuencias no deseadas, como la liberación retardada de nitrógeno u otros productos químicos en ríos, arroyos o aguas subterráneas.

Incluso si los EEF fueran efectivos y ampliamente utilizados por los agricultores, aún podrían aplicarse en exceso como los fertilizantes tradicionales. Los EEF también deberían ir acompañados de programas de educación sólidos para garantizar que sus beneficios se materialicen en la implementación. Otras áreas de innovación incluyen el mercado de prácticas y tecnologías en el borde del campo para atrapar la contaminación por nitrógeno, como los reactores de desnitrificación y las franjas de protección ribereñas.¹⁵⁸

© Jason Johnson/USDA NRCS



Los cultivos de cobertura, como el centeno, pueden ayudar a atrapar el nitrógeno en los campos antes de que se escurra.

VII. UN MEJOR SEGUIMIENTO DE LAS EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO PROVENIENTES DE LOS FERTILIZANTES ES CLAVE PARA ABORDAR LA CRISIS CLIMÁTICA

La medición, el monitoreo, el informe y la verificación (MMRV) eficaces de las emisiones son la base de los intentos de los Estados Unidos por abordar la crisis climática y deben aplicarse a las emisiones de nitrógeno provenientes de los fertilizantes. Desarrollar un panorama más claro de cómo evolucionan a nivel nacional el óxido nitroso y la pérdida de nitrógeno beneficiará tanto a los agricultores como a los consumidores, a la vez que aclarará cómo se están transformando nuestra atmósfera y los ecosistemas.

Como se analiza en la Sección II, la aplicación excesiva de nitrógeno en las tierras de cultivo es uno de los principales impulsores de las emisiones de óxido nitroso, un gas de efecto invernadero importante y la sustancia más abundante que agota el ozono en la estratosfera. El sector agrícola representa entre el 50 y el 70 por ciento de las emisiones globales de óxido nitroso antropogénico, y se proyecta que ese número aumentará hasta un 30 por ciento para 2050 únicamente a partir de fuentes agrícolas si se mantiene un escenario de continuidad de las tendencias actuales.¹⁵⁹

Los esfuerzos de MMRV para otros gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono y metano, están en curso, pero hasta el momento han sido insuficientes en el caso del óxido nitroso. Este retraso en la infraestructura para medir y monitorear las emisiones de óxido nitroso en todo el país contribuye a que el óxido nitroso sea conocido como el “supercontaminante olvidado”. La medición y el monitoreo imprecisos del óxido nitroso dan como resultado una contabilización inexacta de los gases de efecto invernadero y una mayor dificultad para considerar el óxido nitroso al diseñar medidas de intervención. Esto es particularmente importante, ya que algunos esfuerzos

para aumentar el carbono del suelo y la salud del suelo en los sistemas agrícolas pueden aumentar las emisiones de óxido nitroso, una compensación que debe tenerse en cuenta en las decisiones de políticas y financiamiento.¹⁶⁰

Según una estimación de 2025, el óxido nitroso derivado de la aplicación de nitrógeno representa el 91 por ciento de las emisiones relacionadas con los cultivos del sector agrícola de los EE. UU.¹⁶¹ A medida que los incentivos comerciales y regulatorios para gestionar estas emisiones continúan evolucionando, aumenta la importancia de comprenderlas y poder cuantificarlas. Sin un marco sólido de MMRV de óxido nitroso, es difícil medir los impactos de los cambios en las prácticas de gestión por parte de los agricultores o recompensar sus inversiones para mejorar sus prácticas. Esta falta de un marco de medición claro limita las oportunidades económicas para que los agricultores se beneficien de la reducción del óxido nitroso y dificulta la toma de decisiones en la explotación agrícola para mejorar la resiliencia operativa.

Para mejorar el MMRV del óxido nitroso es fundamental coordinar los esfuerzos de investigación, las prioridades de financiamiento y la secuenciación del financiamiento entre todos los niveles del gobierno y el sector privado. A nivel local, estatal, federal e internacional, existe la necesidad de construir infraestructura de datos y desarrollar políticas para medir mejor las emisiones de óxido nitroso. Los institutos de investigación públicos y privados, así como las empresas de tecnología y alimentos, son socios importantes para garantizar que las tecnologías de MMRV se prueben e implementen.¹⁶² Esta coordinación y secuenciación de las inversiones de investigación por parte de líderes federales, estatales y filantrópicos es fundamental para impulsar la innovación del MMRV del óxido nitroso y mejorar nuestra comprensión de los perfiles de emisiones de nitrógeno a escala agrícola, regionales, nacionales y globales.

¿QUÉ SIGNIFICA MMRV?

MMRV significa medición, monitoreo, informe y verificación. En la mitigación climática, MMRV se refiere al proceso de varios pasos que comienza con la **medición** de la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, ya sea reducidas o eliminadas de la atmósfera mediante una actividad de mitigación específica, como la disminución de las emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes. Estas reducciones deben **monitorearse** con el tiempo para garantizar su continuidad. Luego, los hallazgos se **informan** a un tercero de confianza, que **verifica** el informe para que los resultados puedan certificarse.

El objetivo de MMRV es probar que una actividad realmente ha impedido o eliminado las emisiones de gases de efecto invernadero nocivos para que se puedan documentar los impactos de esta actividad, se puedan desarrollar o mejorar nuevas actividades, o se pueda asignar un valor monetario a las actividades.



Los instrumentos como las cámaras de flujo son vitales para el seguimiento de las emisiones de óxido nitroso.

© Dr. Kristofor R. Brye

VIII. CONCLUSIÓN

La evidencia es clara: la contaminación por nitrógeno no es un problema agrícola aislado, sino una crisis ambiental y de salud pública generalizada con consecuencias económicas de gran alcance. Décadas de programas voluntarios no han logrado frenar la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados sintéticos y estiércol, dejando a las comunidades con agua potable insegura, ecosistemas en deterioro y contribuyentes que deben asumir los costos de una remediación costosa. La ciencia muestra que mejorar la gestión del nitrógeno mediante la reducción de la aplicación excesiva de fertilizantes y la minimización de la descarga de nitrógeno es factible y eficaz, y hacerlo proporcionaría agua más limpia, ecosistemas más saludables y beneficios climáticos significativos sin sacrificar la productividad agrícola. Durante demasiado tiempo, a las comunidades se les ha planteado una falsa disyuntiva entre el agua limpia y la producción de alimentos.

Para lograr estos resultados, los estados deben ir más allá de la capacitación y los incentivos, y adoptar estándares exigibles basados en resultados que alineen la aplicación de fertilizantes nitrogenados con los requisitos de los cultivos y exijan la implementación de prácticas para reducir la escorrentía de nitrógeno. Junto con asistencia técnica sólida, apoyo financiero dirigido y responsabilidad compartida por parte de las empresas de fertilizantes y alimentos, estas medidas pueden crear condiciones equitativas para los agricultores e impulsar la innovación y la expansión en las prácticas agrícolas sostenibles. Ahora es el momento para que los legisladores, los líderes de la industria y los agricultores trabajen juntos para implementar soluciones que apoyen las economías agrícolas prósperas y protejan nuestra agua, nuestra salud y nuestro futuro.

© Dillon Naber Cruz/Shutterstock



APÉNDICE: PREGUNTAS FRECUENTES SOBRE LA CRISIS DE CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO

¿CUÁL ES LA PRINCIPAL FUENTE DE CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO EN LOS ESTADOS UNIDOS?

El exceso de nitrógeno de los sistemas agrícolas es la principal fuente de contaminación por nitrógeno en la atmósfera y en muchas cuencas hidrográficas de los Estados Unidos.

La escorrentía de nitrógeno proveniente de la agricultura es la principal fuente de contaminación por nitrógeno en la atmósfera, así como en muchas de las cuencas hidrográficas de los Estados Unidos que experimentan una degradación de la calidad del agua. En la atmósfera, los aportes de nitrógeno agrícola representan entre el 50 y el 70 por ciento de las emisiones antropogénicas de óxido nitroso a nivel global.¹⁶³ Estas emisiones agrícolas de óxido nitroso son una razón importante por la que el óxido nitroso es actualmente la sustancia más abundante que agota el ozono estratosférico.¹⁶⁴

Existen muchas fuentes potenciales de contaminación por nitrógeno acuático —fertilizantes sintéticos y orgánicos, aguas residuales municipales, fijación biológica de nitrógeno y deposición atmosférica de nitrógeno—, y la mezcla específica de fuentes que afectan a una cuenca hidrográfica en particular a menudo dependerá de la ubicación de esa cuenca hidrográfica. Los estudios que utilizan tanto el modelado como isótopos estables para monitorear las fuentes de nitrógeno en aguas subterráneas y superficiales confirman que los aportes de nitrógeno agrícola son la principal fuente de nitrato en aguas subterráneas en cuencas hidrográficas de todo el mundo.¹⁶⁵ En aguas subterráneas y superficiales, los sistemas agrícolas pueden contribuir entre el 56 y el 88 por ciento de la contaminación por nitrógeno, dependiendo de la cuenca hidrográfica, en gran medida a través de la escorrentía de nitrógeno de fertilizantes sintéticos y estiércol.¹⁶⁶ Incluso pequeños aumentos en la aplicación de fertilizantes pueden tener un impacto, y se estima que un aumento del 10 por ciento en el uso de fertilizante nitrogenado (kg) en una cuenca hidrográfica conduce a un aumento del 1,525 por ciento en la concentración de nitrógeno (mg/L) en el agua superficial.¹⁶⁷ En todos los Estados Unidos, el fertilizante nitrogenado sintético es la mayor fuente de nitrógeno en el 41 por ciento de las cuencas hidrográficas, y la agricultura es la fuente dominante de escorrentía hacia los estuarios costeros de la costa este y del este del Golfo de México.¹⁶⁸

¿HAY REALMENTE UNA APLICACIÓN EXCESIVA DE FERTILIZANTES?

Sí. Numerosos estudios demuestran que en los campos agrícolas se aplica más fertilizante nitrogenado del que las plantas pueden utilizar, particularmente en zonas críticas, y las cantidades reales de aplicación excesiva varían según la ubicación y el tipo de cultivo.

Desde hace décadas se reconoce que la aplicación excesiva de fertilizantes constituye un problema a escala global.¹⁶⁹ Se estima que entre el 40 y el 60 por ciento del nitrógeno aplicado

a los campos de los EE. UU. no es utilizado por los cultivos y, en cambio, se escurre al medioambiente.¹⁷⁰ Muchos estudios han demostrado que una cantidad significativa de agricultores en los Estados Unidos aplica nitrógeno en cantidades que exceden las recomendaciones de las universidades públicas de investigación agrícola. En 2006, un estudio del USDA descubrió que el 64 por ciento de las hectáreas de cultivos fertilizados de los EE. UU. no cumplían con los criterios de gestión del nitrógeno, incluidos la tasa, el momento y la colocación del fertilizante nitrogenado. En aproximadamente el 32 por ciento de estas se aplicaba más nitrógeno del recomendado.¹⁷¹

Sin embargo, no todas las tierras agrícolas contribuyen a la escorrentía de nitrógeno por igual. Un estudio de 2021 reveló que las zonas críticas de nitrógeno en solo aproximadamente el 24 por ciento del área de tierras de cultivo de los EE. UU., la mayoría de las cuales estaba dominada por cultivos para alimento animal, representan colectivamente alrededor del 63 por ciento del saldo total de nitrógeno excedente.¹⁷² Otro estudio de 2021 reveló que aproximadamente entre el 2 y el 8 por ciento del área terrestre dentro de los Estados Unidos continentales representó el 75 por ciento de la contaminación por nitrógeno estimada en ríos y lagos.¹⁷³ Estos estudios destacan cómo la falta de datos precisos sobre la aplicación de fertilizantes puede dificultar la comprensión del alcance completo de la contaminación por nitrógeno en los Estados Unidos y también subrayan cómo la mayor parte de la contaminación agrícola por nitrógeno en este país se origina en zonas críticas de nitrógeno.

Existe un historial documentado de aplicación excesiva de nitrógeno dentro de las zonas críticas de nitrógeno de los EE. UU. En 2014, un estudio de tres estados del medio oeste descubrió que aproximadamente el 37 por ciento de los 134 agricultores entrevistados aplicaba nitrógeno en exceso en cantidades de 5,6 kilogramos por hectárea o más.¹⁷⁴ El tamaño promedio de la granja era de unas 654 hectáreas, lo que equivale a una aplicación excesiva estimada de al menos 181, 440 kilogramos de nitrógeno por año, solo para esa área de estudio. Un estudio de 2020 sobre cultivos de maíz de Illinois mostró que el 67 por ciento de la superficie analizada recibía aplicaciones de nitrógeno superiores al valor de máximo retorno económico del nitrógeno, y el 33 por ciento de los campos aplicaba al menos 22,4 kg de nitrógeno por hectárea por encima de la tasa recomendada.¹⁷⁵ Finalmente, en un estudio de 2014 de agricultores de Iowa, más de la mitad de los encuestados coincidió en que “los agricultores aplican cantidades excesivas de nitrógeno para garantizar el rendimiento”.¹⁷⁶

Es probable que la aplicación excesiva continúe. Aplicar más fertilizante de nitrógeno es una de las respuestas documentadas de los agricultores al aumento del potencial de patrones irregulares de lluvia y eventos climáticos extremos vinculados con el cambio climático.¹⁷⁷ La idea es que quedará nitrógeno adicional para apoyar el crecimiento de los cultivos después de que un evento de lluvia disminuya los niveles de nitrógeno en el suelo. Si bien esta respuesta se considera una solución rápida, en realidad puede exacerbar el cambio climático y los problemas

de contaminación por nitrógeno, y se proyecta que será un factor clave en el aumento de la escorrentía de nitrógeno de los campos agrícolas susceptibles en las próximas décadas.¹⁷⁸

¿POR QUÉ LOS AGRICULTORES APLICAN FERTILIZANTES NITROGENADOS EN EXCESO?

Los agricultores a menudo aplican más fertilizante de nitrógeno de lo que las plantas necesitan para gestionar el riesgo, maximizar los rendimientos y aprovechar las pólizas de seguro y los contratos de suministro que incentivan la aplicación excesiva.

Hay dos razones principales por las que los agricultores pueden estar motivados a aplicar fertilizantes nitrogenados en exceso: aumentar los rendimientos y reducir el riesgo. Se supone que una mayor aplicación de nitrógeno resulta en mayores rendimientos, y mayores rendimientos ayudan a los agricultores a mantener sus tasas de seguro de cultivos, obtener préstamos bancarios y garantizar contratos con compradores industriales a mayor escala.¹⁷⁹

El rendimiento del cultivo aumenta con la cantidad de nitrógeno aplicado, hasta un punto óptimo (“B” en la figura A1). A partir de este punto, los agricultores solo ven mejoras marginales en el rendimiento con el aumento del nitrógeno aplicado, pero este aumento aún crea un incentivo perverso para aplicar fertilizantes nitrogenados en exceso más allá de lo que es económicamente óptimo, para evitar quedarse por debajo del rendimiento máximo.¹⁸⁰ Después de la tasa óptima, el cultivo no utiliza una mayor proporción del nitrógeno aplicado y se desperdicia. Sin embargo, la combinación de operar con márgenes de ganancias pequeños y el bajo costo de los fertilizantes nitrogenados (en relación con otros costos agrícolas) significa que los agricultores aún optan por obtener las ganancias marginales asociadas con rendimientos disminuidos.¹⁸¹

La aplicación excesiva también funciona como una estrategia de gestión de riesgos.¹⁸² Algunos agricultores aplican exceso de nitrógeno para proporcionar una protección contra las pérdidas

de rendimiento que podrían ocurrir o para obtener beneficios de las condiciones climáticas ideales. Irónicamente, el cambio climático impulsado en parte por las emisiones de nitrógeno de las tierras de cultivo aumenta los patrones climáticos impredecibles y puede hacer que esas condiciones de cultivo ideales sean menos probables.¹⁸³

La práctica de la aplicación excesiva para mitigar el riesgo se ha vuelto tan frecuente que muchos agricultores creen que cualquier reducción en sus aplicaciones de nitrógeno conducirá a pérdidas de rendimiento o de ganancias.¹⁸⁴ Sin embargo, los estudios muestran que en algunas situaciones el uso de nitrógeno puede reducirse hasta a la mitad sin reducir la productividad agrícola, y que la aplicación excesiva se debe en gran medida a las percepciones del riesgo.¹⁸⁵

Las pólizas de seguro pueden incentivar la aplicación excesiva de fertilizantes.¹⁸⁶ Para recibir pagos de seguro de cultivos, el Programa Federal de Seguros de Cultivos de los EE. UU. exige que los agricultores demuestren que no fueron culpables de fallas en los cultivos al demostrar que estaban siguiendo “buenas prácticas agrícolas”.¹⁸⁷ A los agricultores se les pueden negar los pagos del seguro por fertilizar insuficientemente sus cultivos, lo que los alienta a optar por la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados. La cobertura del seguro de cultivos también es a menudo un requisito previo para que los agricultores soliciten préstamos bancarios.¹⁸⁸ La cobertura del seguro de cultivos depende del historial de producción real (Actual Production History, APH), que se calcula utilizando el promedio de los registros de rendimiento de los 4 a 10 años anteriores de un agricultor.¹⁸⁹ Los APH más altos pueden mejorar la cobertura del seguro de cultivos de un agricultor y alentar a los agricultores a aplicar fertilizantes nitrogenados en exceso para lograr rendimientos más altos. En 2023, el USDA dio un paso importante para abordar la incompatibilidad entre el seguro de cultivos y las prácticas agrícolas sostenibles, alineando las reglas del seguro de cultivos con las pautas del NRCS para prácticas como los cultivos de cobertura.¹⁹⁰

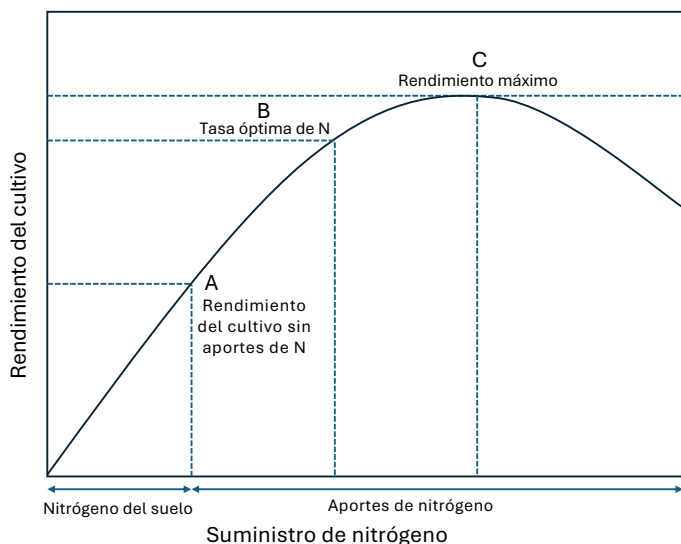
Los contratos de suministro entre corporaciones y agricultores también incentivan la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados. Dos tipos de contratos dominan el sector agrícola: de torneo y de tasa fija. Los contratos de torneo enfrentan a los productores entre sí y pagan sobre la base de las clasificaciones de los agricultores.

Esto recompensa a los agricultores que producen los mayores rendimientos y penaliza a aquellos que no lo hacen, a veces con la cancelación de contratos.¹⁹¹ Los contratos de torneo, que son frecuentes para la producción de semillas de maíz, introducen un incentivo extremo para aplicar fertilizantes nitrogenados en exceso con la esperanza de maximizar el rendimiento. En un estudio, los agricultores que producen semillas tanto para semilla de maíz como para el maíz comercial informaron que aplicaron cuatro veces más nitrógeno por hectárea en las superficies destinadas a la producción de semillas de maíz que en las destinadas a la producción de maíz comercial.¹⁹²

Los contratos de tasa fija, que se utilizan principalmente para la producción de frutas y verduras, influyen directamente en las decisiones de los agricultores sobre fertilización debido a las prácticas de fertilización y control de calidad que se estipulan en los contratos.¹⁹³ En virtud de algunos contratos de producción de tasa fija muy específicos, los compradores a gran escala exigen tasas de aplicación de fertilizantes, lo que deja a los agricultores sin ningún control sobre sus prácticas de fertilización.¹⁹⁴

FIGURA A1

El fertilizante nitrogenado puede ser económicamente beneficioso y mejorar el rendimiento, pero solo hasta cierto punto..



Los minoristas de fertilizantes también influyen en las prácticas de fertilización con nitrógeno implementadas por los agricultores. Los estudios revelan que los minoristas de fertilizantes son sistemáticamente considerados la fuente más confiable de información sobre la gestión del nitrógeno, lo que refleja un cambio significativo desde los especialistas del sector público hacia fuentes del sector privado.¹⁹⁵ Los agricultores creen que el interés de un minorista de fertilizantes en proteger la producción de los agricultores se alinea estrechamente con sus propios motivos de lucro.¹⁹⁶ Lamentablemente, los minoristas de fertilizantes también tienen un interés financiero en vender la mayor cantidad posible de fertilizantes.

Por último, la presión del gobierno ha llevado las cantidades de aplicación de nitrógeno a niveles cada vez más altos. La crisis actual de contaminación por nitrógeno tiene sus raíces en una decisión de política pública adoptada por los Estados Unidos en la década de 1970, cuando el secretario del USDA, Earl Butz, se propuso aumentar drásticamente la producción de maíz y soja e impulsó a agricultores y ganaderos de todo el país a “crecer o desaparecer la actividad” la agricultura.¹⁹⁷ Los agricultores ahora operan en un entorno donde generaciones de políticas han hecho que la consolidación y el crecimiento se encuentren entre las pocas estrategias de supervivencia a su disposición.

¿LA REDUCCIÓN DE LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES NITROGENADOS HARÁ QUE LOS CULTIVOS NO RECIBAN SUFICIENTE NITRÓGENO?

No. Dado que los cultivos no absorben entre el 40 y el 60 por ciento del nitrógeno aplicado a los campos, el uso de nitrógeno, particularmente en los puntos críticos, puede reducirse sin impactos significativos en el rendimiento.

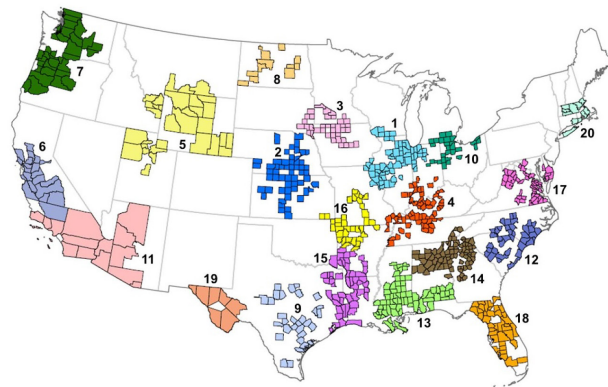
Como se analizó anteriormente en esta sección, los puntos críticos de nitrógeno representan la mayor parte del excedente de nitrógeno y la aplicación excesiva en los Estados Unidos. Esto significa que los esfuerzos de reducción de nitrógeno dirigidos a áreas y sistemas de cultivo específicos (en particular, sistemas de cultivo menos eficientes que producen alimento para animales) pueden tener un impacto desproporcionado en la reducción del desperdicio de nitrógeno con un impacto mínimo en el rendimiento.¹⁹⁸

Los estudios muestran que tanto los aportes de nitrógeno como las pérdidas de nitrógeno de los campos agrícolas pueden reducirse significativamente sin una pérdida de productividad agrícola, particularmente en áreas de bajo rendimiento.¹⁹⁹ Mantener la productividad con tasas de nitrógeno más bajas que las que muchos agricultores utilizan actualmente es posible tanto porque se está produciendo una aplicación excesiva como porque la mayoría del nitrógeno que las plantas utilizan durante la temporada de cultivo en realidad proviene de la materia orgánica del suelo.²⁰⁰ Es por eso que las pruebas de nitrógeno en el suelo, que miden la reserva de nitrógeno del suelo, son importantes. El aumento del nitrógeno almacenado en la materia orgánica del suelo ayuda a reducir la pérdida, ya que el nitrógeno atrapado en la materia orgánica del suelo es menos susceptible a la lixiviación.²⁰¹ El legado de la aplicación excesiva de nitrógeno en los Estados Unidos significa que los suelos pueden contener reservas significativas de nitrógeno que pueden utilizarse para suministrar a los cultivos y reducir la necesidad de aplicación. Sin embargo, aunque un número creciente de agricultores realizan pruebas de nitrógeno en el suelo, no está claro si los resultados de esas pruebas informan o influyen en las decisiones

de gestión de fertilizantes.²⁰² No considerar el nitrógeno en el suelo puede ser una de las razones por las que las granjas menos rentables gastan un 30 por ciento más en fertilizantes que las granjas más rentables.²⁰³

La productividad agrícola también se puede mantener aumentando la eficiencia del uso de nitrógeno mediante prácticas que retienen el nitrógeno en los campos. Los cultivos de cobertura pueden reducir la incidencia tanto de la lixiviación de nitrógeno como de la erosión del suelo, a la vez que atrapan nitrógeno en los residuos del cultivo para que se libere durante la siguiente temporada de cultivo. Las franjas de protección ribereñas y las franjas de borde de campo pueden atrapar el nitrógeno antes de que escurra hacia cuerpos de agua superficial. La diversificación de cultivos puede garantizar que diferentes compartimentos del suelo se aprovechen para el nitrógeno, y el uso de leguminosas puede mejorar la fijación de nitrógeno. Establecer límites claros en la aplicación y la descarga de nitrógeno de los campos puede acelerar la adopción de estas prácticas.²⁰⁴ Tener en cuenta el nitrógeno suministrado por el suelo y los residuos de los cultivos al planificar las aplicaciones de fertilizantes es una práctica adoptada en varios otros países. Los presupuestos de nitrógeno en Alemania y Dinamarca estiman la cantidad de nitrógeno proporcionada por los residuos de cultivos de cobertura y la mineralización del suelo, y reducen las tasas recomendadas de nitrógeno en esa misma cantidad.²⁰⁵

FIGURA A2: UN MAPA DE PUNTOS CRÍTICOS DE EXCEDENTE DE N EN LOS ESTADOS UNIDOS DONDE UNA MEJOR GESTIÓN DEL N PODRÍA REDUCIR LAS PÉRDIDAS SIN IMPACTOS SIGNIFICATIVOS EN EL RENDIMIENTO. LOS NÚMEROS CORRESPONDEN A LAS CLASIFICACIONES SEGÚN EL EXCEDENTE TOTAL DE N (TONELADAS MÉTRICAS DE N POR AÑO-1), DE MAYOR A MENOR²⁰⁶



¿NO PODEMOS RESOLVER LA CRISIS DE CONTAMINACIÓN POR NITRÓGENO CON NUEVAS TECNOLOGÍAS?

No. Si bien las nuevas tecnologías e innovaciones desempeñarán un papel importante, no resolverán la crisis de contaminación por nitrógeno por sí solas porque pueden utilizarse indebidamente.

Si bien las soluciones tecnológicas continuarán desempeñando un papel importante en la reducción de la contaminación por nitrógeno, depender únicamente de la tecnología para aumentar la eficiencia del uso de nitrógeno puede no reducir realmente la aplicación excesiva de nitrógeno. De hecho, aumentar la eficiencia del uso de recursos puede aumentar el uso general de dichos recursos. Esta idea, llamada la paradoja de Jevons, se ha observado en otros campos, como la energía alternativa y la

tecnología de riego.²⁰⁷ Un ejemplo específico del nitrógeno es la aplicación fraccionada de fertilizante —una práctica destinada a aplicar cantidades más pequeñas de fertilizante en momentos en los que las plantas pueden absorberlo mejor—, lo que se ha descubierto que en realidad aumenta la aplicación general de nitrógeno.²⁰⁸

Los enfoques técnicos graduales para abordar la contaminación por nutrientes agrícolas pueden no ser suficientes por sí solos porque las decisiones sobre la aplicación de nitrógeno en las granjas están impulsadas no solo por consideraciones económicas, sino también por la gestión de riesgos e incentivos estructurales, como el seguro de cultivos. Debido a esto, existe la necesidad de modificar las condiciones estructurales, sociales y ecológicas del sistema agrícola moderno para garantizar que los alimentos se produzcan sin comprometer los recursos naturales de los que depende la producción. Esto implica combinar los avances tecnológicos con cambios sistémicos más amplios, como límites a la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados y a la escorrentía de nitrógeno, una mayor rendición de cuentas del sistema alimentario por la contaminación por nitrógeno, la contabilización de la mineralización del nitrógeno del suelo, el aumento de la diversificación de cultivos, la reforma de seguros e incentivos y la mejora de los informes.²⁰⁹

Ya existen tecnologías prometedoras que podrían reducir significativamente la contaminación por nitrógeno cuando se combinan con cambios en las prácticas. Los fertilizantes de eficiencia mejorada (EEF) y la introducción de nuevas variedades de cultivos, así como las tecnologías de riego y labranza, pueden combinarse con enmiendas de carbono orgánico, rotación de cultivos con leguminosas y zonas de protección para lograr grandes beneficios.²¹⁰

Sin embargo, como se analizó anteriormente en la Sección VI, los avances tecnológicos no constituyen un enfoque único para todos los casos. Por ejemplo, algunos EEF están diseñados para reducir la cantidad de nitrógeno que se pierde de los campos mediante recubrimientos que ralentizan la velocidad a la que se libera ese nitrógeno. Reducir las pérdidas de nitrógeno con los EEF puede dar a los agricultores más tiempo para utilizar cualquier exceso de nitrógeno en un segundo cultivo o en un cultivo de cobertura posterior a la cosecha. Estos beneficios pueden perderse por una mala gestión del momento y la tasa de aplicación del fertilizante.

Los fertilizantes de eficiencia mejorada disponibles actualmente tampoco son necesariamente efectivos en todas las condiciones, incluso en algunos sistemas húmedos de trigo y maíz. Para crear un entorno propicio en el que estos avances tecnológicos puedan cumplir con su promesa, debe establecerse claramente la necesidad de reducir las tasas de aplicación de fertilizantes nitrogenados y la escorrentía de nitrógeno; dicha necesidad existe claramente en un sentido ambiental, pero no en un sentido económico o regulatorio bajo el sistema actual.

¿NO PODRÍA UN IMPUESTO SOBRE LOS FERTILIZANTES RESULTAR EN UN MENOR USO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS?

No. Un impuesto que aumente los precios de los fertilizantes no necesariamente reducirá la aplicación de nitrógeno, pero puede aumentar los costos de los agricultores porque la aplicación excesiva también está impulsada por otros factores.

Una solución propuesta para la crisis de contaminación por nitrógeno es la implementación de impuestos o cargos adicionales sobre el fertilizante nitrogenado. La lógica es que si el fertilizante cuesta más, los agricultores deberán reducir sus tasas de aplicación para mantener estables los costos de los insumos. Sin embargo, esto no necesariamente se aplicaría en la práctica, ya que los impulsores de la aplicación de fertilizantes no son meramente económicos; los precios de los cultivos importan más que los precios de los fertilizantes, y los costos del nitrógeno representan solo una fracción del costo total de gestionar una explotación agrícola.

Como se analizó anteriormente, los agricultores a menudo aplican más nitrógeno del que las plantas necesitan para gestionar los riesgos potenciales o maximizar el rendimiento. El mercado actual está estructurado para incentivar el rendimiento por encima de todo, lo que se refleja en el diseño de los contratos de los productores, las primas del seguro de cultivos y otros factores que impulsan las decisiones de los agricultores sobre los fertilizantes al margen del precio del fertilizante. En los casos en los que los precios de los cultivos son altos, existe un alto potencial de retorno sobre la inversión, lo que hace que sea más factible económicamente aplicar más fertilizante durante la temporada para maximizar el rendimiento potencial, incluso si parte de este se desperdicia. El gasto en fertilizantes en relación con los ingresos potenciales también puede ser pequeño, a menudo solo alrededor del 1 al 2 por ciento del presupuesto agrícola en el caso de algunos cultivos de alto valor.

Por ejemplo, los costos de fertilizantes para la lechuga cultivada en la región de la Costa Central de California siguen siendo generalmente inferiores al 1 por ciento de los ingresos brutos, incluso en escenarios de tasas de fertilización extremadamente altas. Debido a que los costos de los fertilizantes son una fracción tan pequeña de los ingresos brutos, reducir las tasas de aplicación de fertilizantes en 78,5 a 112 kilogramos de nitrógeno por hectárea no resulta en ahorros significativos de costos para los productores; menos de 123,55 USD por hectárea en la mayoría de los años. Sin embargo, los precios de la lechuga pueden llegar hasta aproximadamente 52 000 USD por hectárea, lo que significa que el costo económico para los agricultores por aplicar una tasa excesiva puede ser bajo, mientras que los beneficios percibidos pueden ser bastante altos.

Además, la presencia de subsidios y seguro de cultivos puede distorsionar el impacto de los precios de los fertilizantes. Con el rendimiento promedio del maíz de Minnesota observado durante los últimos cinco años (11,7 toneladas por hectárea), el precio de equilibrio del maíz osciló entre 145 USD y 194 USD por tonelada. En 2025, el USDA estimó los costos de producción en 2217 USD por hectárea, lo que haría que el precio de equilibrio con los rendimientos promedio de Minnesota fuera de 192 USD por tonelada, muy por encima del precio de agosto de 146 USD por tonelada o incluso del precio de septiembre de aproximadamente 157 USD por tonelada. Incluso sin incluir ningún fertilizante, los costos de producción son de aproximadamente 9,81 USD por hectárea, lo que hace imposible cultivar maíz rentable de rendimiento promedio en Minnesota incluso si el fertilizante fuera gratis, dados los bajos precios del maíz. En este caso, la aplicación de fertilizantes estaría determinada por los rendimientos necesarios para cumplir los contratos o satisfacer los requisitos del seguro de cultivos.

- 1 Matthew Houser, “Farmer Motivations for Excess Nitrogen Use in the U.S. Corn Belt” (Motivaciones de los agricultores para el uso excesivo de nitrógeno en el cinturón del maíz [Corn Belt] de los EE. UU.), *Case Studies in the Environment* 6, n.º 1 (2022): 1688823, <https://doi.org/10.1525/cse.2022.1688823>; Glenn Sheriff, “Efficient Waste? Why Farmers Over-Applied Nutrients and the Implications for Policy Design” (¿Residuos eficientes? Por qué los agricultores aplican nutrientes en exceso y las implicaciones para el diseño de políticas), *Review of Agricultural Economics* 27, n.º 4 (2005): 542-557, <https://doi.org/10.1111/j.1467-9353.2005.00263.x>; Benjamin Z. Houlton et al., “Intentional Versus Unintentional Nitrogen Use in the United States: Trends, Efficiency and Implications” (Uso intencional versus no intencional de nitrógeno en los Estados Unidos: tendencias, eficiencia e implicaciones), *Biogeochemistry* 114, n.º 1 (2013): 11-23, <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9801-5>.
- 2 Thomas Tomich et al., *The California Nitrogen Assessment: Challenges and Solutions for People, Agriculture, and the Environment (La evaluación del nitrógeno en California: desafíos y soluciones para las personas, la agricultura y el medioambiente)* (Oakland, CA: 2016), <https://www.ucpress.edu/books/the-california-nitrogen-assessment/paper>; Jenessa Duncombe, “Index Suggests That Half of Nitrogen Applied to Crops Is Lost” (El índice sugiere que la mitad del nitrógeno aplicado a los cultivos se pierde), *Eos*, 23 de agosto de 2021, <https://eos.org/articles/index-suggests-that-half-of-nitrogen-applied-to-crops-is-lost>.
- 3 Keith Fluegge y Kyle Fluegge, “Air Pollution and Risk of Hospitalization for Epilepsy: The Role of Farm Use of Nitrogen Fertilizers and Emissions of the Agricultural Air Pollutant, Nitrous Oxide” (Contaminación del aire y riesgo de hospitalización por epilepsia: el papel del uso agrícola de fertilizantes nitrogenados y las emisiones del contaminante del aire agrícola, óxido nítrico), *Archivos de Neuro-Psiquiatría* 75, n.º 9 (2017): 614-619, <https://doi.org/10.1590/0004-282X20170107>; Kathleen Belanger et al., “Household Levels of Nitrogen Dioxide and Pediatric Asthma Severity” (Niveles de dióxido de nitrógeno en el hogar y la gravedad del asma pediátrico), *Epidemiology* 24, n.º 2 (2013): 320-330, <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e318280e2ac>.
- 4 Greenhouse Gas Protocol, “IPCC Global Warming Potential Values” (Valores de Potencial de Calentamiento Global del IPCC), 7 de agosto de 2024, <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf>.
- 5 Kelsey L. Griesheim et al., “Nitrogen-15 Evaluation of Fall-Applied Anhydrous Ammonia: I. Efficiency of Nitrogen Uptake by Corn” (Evaluación de nitrógeno-15 del amoníaco anhidro aplicado en otoño: I. Eficiencia de la absorción de nitrógeno por el maíz), *Soil Science Society of America Journal* 83, n.º 6 (2019): 1809-1818, <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.04.0098>; Jennifer B. Gardner y Laurie E. Drinkwater, “The Fate of Nitrogen in Grain Cropping Systems: A Meta-Analysis of 15N Field Experiments” (El destino del nitrógeno en sistemas de cultivo de granos: metaanálisis de experimentos de campo con nitrógeno-15), *Ecological Applications* 19, n.º 8 (2009): 2167-2184, <https://doi.org/10.1890/08-1122.1>; Tomich et al., *California Nitrogen Assessment* (La evaluación del nitrógeno en California).
- 6 Caitrin Chappelle, Ellen Hanak y Annabelle Rosser, “Paying for California’s Water System” (El financiamiento del sistema de agua de California), Public Policy Institute of California, mayo de 2021, <https://www.ppic.org/publication/paying-for-californias-water-system/>.
- 7 David A. Keiser et al., “Gross External Damages of Water Pollution in the United States” (Daños externos totales de la contaminación del agua en los Estados Unidos), preimpresión, Universidad de Massachusetts-Amherst, 11 de julio de 2025, <https://drive.google.com/file/d/1JG9hLJ8lGho3OJ4VkpP9ce64d1Hdt7OUZ/view>.
- 8 “About the Healthy Soils Program” (Acerca del Programa de Suelos Saludables), Oficina de Resiliencia y Sustentabilidad Agrícola, Departamento de Alimentos y Agricultura de California, consultado el 13 de enero de 2026, <https://www.cdff.ca.gov/oars/healthysouls/>.
- 9 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, *2025 Minnesota Nutrient Reduction Strategy* (Estrategia de Reducción de Nutrientes de Minnesota), 2025, <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-sl-87a.pdf>; Junta Regional de Control de Calidad del Agua de la Costa Central de California, “General Waste Discharge Requirements for Discharges from Irrigated Lands” (Requisitos Generales de Descarga de Residuos para Descargas de Tierras Irrigadas), orden n.º R3-2021-0040 (15 de abril de 2021), anexo A, 140-141, https://www.waterboards.ca.gov/centralcoast/water_issues/programs/ilp/docs/ag_order4/2021/ao4_att_a.pdf; Iris T. Stewart et al., “Toward the Human Right to Water for Vulnerable Communities: The Effectiveness of Stakeholder Processes to Control Regional Shallow Groundwater Contamination by Nitrates” (Hacia el derecho humano al agua para las comunidades vulnerables: la efectividad de los procesos de las partes interesadas para controlar la contaminación regional por nitratos de aguas subterráneas poco profundas), *Water Resources Research* 61, n.º 10 (2025): e2025WR040896, <https://doi.org/10.1029/2025WR040896>; Anne Weir Schechinger, “In Thousands of Communities, Nitrate Contamination of Drinking Water Is Getting Worse” (En miles de comunidades, la contaminación por nitratos del agua potable está empeorando), Environmental Working Group, 24 de junio de 2020, <https://www.ewg.org/interactive-maps/2020-nitrate-pollution-of-drinking-water-for-more-than-20-million-americans-is-getting-worse/map/>; Junta Regional de Control de Calidad del Agua de la Costa Central de California, “Irrigated Lands Program Technical Report on Total Nitrogen Applied (TNA) and Irrigation and Nutrient Management Plan (INMP) Summary Report Data” (Informe técnico del Programa de Tierras de Riego sobre el nitrógeno total aplicado y datos resumidos del informe del Plan de Gestión de Riego y Nutrientes), 4 de abril de 2025, https://www.waterboards.ca.gov/rwqcb3/water_issues/programs/ilp/docs/r3-ar-technical-report.pdf.
- 10 J. W. Erisman et al., “Reduced Nitrogen in Ecology and the Environment” (Nitrógeno reducido en la ecología y el medioambiente), *Environmental Pollution* 150, n.º 1 (2007): 140-149, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.033>.
- 11 Jan Willem Erisman et al., “How a Century of Ammonia Synthesis Changed the World” (Cómo un siglo de síntesis de amoníaco cambió el mundo), *Nature Geoscience* 1, n.º 10 (2008): 636-639, <https://doi.org/10.1038/ngeo325>.
- 12 Eric A. Davidson et al., “Excess Nitrogen in the U.S. Environment” (La contaminación por exceso de nitrógeno en los EE. UU.), *Issues in Ecology* n.º 15 (2012).
- 13 Maya Korb, Daniel Rath y J. P. Rose, “Too Much Of A Good Thing: Overapplication Of Nitrogen Fertilizer Endangers Human And Environmental Health” (Demasiado de algo bueno: la aplicación excesiva de fertilizantes de nitrógeno pone en peligro la salud humana y ambiental), NRDC, septiembre de 2025, <https://www.nrdc.org/sites/default/files/2025-09/too-much-of-a-good-thing-fs.pdf>.
- 14 Jean D. Brender, “Human Health Effects of Exposure to Nitrate, Nitrite, and Nitrogen Dioxide” (Efectos en la salud humana de la exposición al nitrato, nitrito y dióxido de nitrógeno), en *Just Enough Nitrogen: Perspectives on How to Get There for Regions with Too Much and Too Little Nitrogen (La cantidad justa de nitrógeno: perspectivas sobre cómo llegar allí para regiones con demasiado y muy poco nitrógeno)*, ed. Mark A. Sutton et al. (Springer International Publishing, 2020), https://doi.org/10.1007/978-3-030-58065-0_18.
- 15 Schechinger, “In Thousands of Communities, Nitrate Contamination of Drinking Water Is Getting Worse” (En miles de comunidades, la contaminación con nitratos del agua potable está empeorando).
- 16 Jayne Richards et al., “Nitrate Contamination in Drinking Water and Colorectal Cancer: Exposure Assessment and Estimated Health Burden in New Zealand” (Contaminación por nitratos en el agua potable y cáncer colorrectal: evaluación de la exposición y carga de salud estimada en Nueva Zelanda), *Environmental Research* 204 (marzo de 2022): 112322, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112322>; Samantha Ammons et al., “Nitrate and Disinfection By-Products in Drinking Water and Risk of Ovarian Cancer” (Nitratos y subproductos de la desinfección en el agua potable y riesgo de cáncer de ovario), *Environmental Epidemiology* 9, n.º 3 (2025): e382, <https://doi.org/10.1097/EE9.0000000000000382>; Alexis Temkin et al., “Exposure-Based Assessment and Economic Valuation of Adverse Birth Outcomes and Cancer Risk Due to Nitrate in United States Drinking Water” (Evaluación basada en la exposición y valoración económica de los resultados adversos en el nacimiento y del riesgo de cáncer debido a los nitratos presentes en el agua potable de los Estados Unidos), *Environmental Research* 176 (septiembre de 2019): 108442, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.009>; Jörg Schullehner et al., “Nitrate in Drinking Water and Colorectal Cancer Risk: A Nationwide Population-Based Cohort Study” (Nitrato en agua potable y riesgo de cáncer colorrectal: Estudio de cohorte basado en la población a nivel nacional), *International Journal of Cancer* 143, n.º 1 (2018): 73-79, <https://doi.org/10.1002/ijc.31306>.
- 17 Mary H. Ward et al., “Nitrate Intake and the Risk of Thyroid Cancer and Thyroid Disease” (Ingesta de nitratos y riesgo de cáncer de tiroides y enfermedades tiroideas), *Epidemiology* 21, n.º 3 (2010): 389-395, <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181d6201d>.

- 18 Un vaso de 225 ml de agua a 10 mg/L de nitrato-N tiene 2,25 mg de nitrato. Una “salchicha de refrigerio” cocida tiene alrededor de 31,3 mg/kg de nitrato-N y pesa aproximadamente 60 gramos, equivalente a aprox. 1,878 mg de nitrato por salchicha (Siyuan Sheng et al., “Residual Nitrite and Nitrate in Processed Meats and Meat Analogues in the United States” (Nitrito y nitrato residuales en carnes procesadas y análogos de la carne en los Estados Unidos), *Scientific Reports* 15 (2025), <https://www.nature.com/articles/s41598-025-87563-xz>). Por lo tanto, el vaso de 225 ml de agua con 10 mg/L de nitrato-N tiene aproximadamente 1,2 veces más nitrato que la salchicha.
- 19 Organización Mundial de la Salud, “Cancer: Carcinogenicity of the Consumption of Red Meat and Processed Meat” (Cáncer: carcinogenicidad del consumo de carne roja y carne procesada), 26 de octubre de 2015, <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/cancer-carcinogenicity-of-the-consumption-of-red-meat-and-processed-meat>.
- 20 Rebecca L. Siegel et al., “Colorectal Cancer Statistics, 2026” (Estadísticas del cáncer colorrectal, 2026), *CA: A Cancer Journal for Clinicians* 76, n.º 2 (2026): e70067.
- 21 Schullehner et al., “Nitrate in Drinking Water” (Nitrato en agua potable); Temkin et al., “Exposure-Based Assessment” (Evaluación basada en la exposición).
- 22 Laurel A. Schaider et al., “Environmental Justice and Drinking Water Quality: Are There Socioeconomic Disparities in Nitrate Levels in U.S. Drinking Water?” (Justicia ambiental y calidad del agua potable: ¿existen disparidades socioeconómicas en los niveles de nitrato en el agua potable de los EE. UU.?), *Environmental Health* 18, n.º 1 (2019): 3-17, <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0442-6>.
- 23 Schaider et al., “Environmental Justice and Drinking Water Quality” (Justicia ambiental y calidad del agua potable).
- 24 Leslie A. DeSimone, Peter B. McMahon y Michael R. Rosen, *The Quality of Our Nation's Waters: Quality of Water from Domestic Wells in Principal Aquifers of the United States, 1991-2004—Overview of Major Findings* (La calidad de las aguas de nuestra nación: calidad del agua de pozos domésticos en los principales acuíferos de los Estados Unidos, 1991-2004—Descripción general de los principales hallazgos), Servicio Geológico de los EE. UU., 2009, <https://doi.org/10.3133/cir1332>.
- 25 “The Quality of Our Nation's Waters: Water Quality in Principal Aquifers of the United States, 1991-2010” (La calidad de las aguas de nuestra nación: calidad del agua en los principales acuíferos de los Estados Unidos, 1991-2010), Circular 1360 del USGS, figura 6-7, <https://pubs.usgs.gov/publication/cir1360>.
- 26 Carolina Balazs et al., “Social Disparities in Nitrate-Contaminated Drinking Water in California's San Joaquin Valley” (Desigualdades sociales en el acceso a agua potable contaminada con nitratos en el Valle de San Joaquín, California), *Environmental Health Perspectives* 119, n.º 9 (2011): 1272-1278, <https://doi.org/10.1289/ehp.1002878>.
- 27 Emmanuel Padmore Mantey et al., “Disparities in Potential Nitrate Exposures Within Iowa Public Water Systems” (Disparidades en las posibles exposiciones al nitrato dentro de los sistemas públicos de agua de Iowa), *Environmental Science: Water Research & Technology* 11, n.º 4 (2025): 959-971. <https://doi.org/10.1039/D4EW00907J>.
- 28 Schaider et al., “Environmental Justice and Drinking Water Quality” (Justicia ambiental y calidad del agua potable).
- 29 Junta Regional de Control de Calidad del Agua de California, “General Waste Discharge Requirements” (Requisitos generales de descarga de residuos), anexo A.
- 30 Kyle S. Van Houtan et al., “Eutrophication and the Dietary Promotion of Sea Turtle Tumors” (Eutrofización y desarrollo de tumores en tortugas marinas a través de la dieta), *PeerJ* 2 (septiembre de 2014): e602, <https://doi.org/10.7717/peerj.602>; Costanza Manes et al., “Occurrence of Fibropapillomatosis in Green Turtles (Chelonia Mydas) in Relation to Environmental Changes in Coastal Ecosystems in Texas and Florida: A Retrospective Study” (Presencia de fibropapilomatosis en tortugas verdes (Chelonia mydas) en relación con los cambios ambientales en los ecosistemas costeros de Texas y Florida: estudio retrospectivo), *Animals* 12, n.º 10 (2022): 1236, <https://doi.org/10.3390/ani12101236>.
- 31 Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (Environmental Protection Agency, EPA), *National Lakes Assessment: The Fourth Collaborative Survey of Lakes in the United States* (Evaluación Nacional de los Lagos: Cuarta encuesta colaborativa de lagos en los Estados Unidos), 2024, <https://nationallakesassessment.epa.gov/webreport/>; EPA, *National Rivers and Streams Assessment: The Third Collaborative Survey of Rivers and Streams in the United States* (Evaluación nacional de ríos y arroyos: tercera encuesta colaborativa de ríos y arroyos en los Estados Unidos), 2024, <https://riverstreamassessment.epa.gov/webreport/>.
- 32 EPA, “The Effects: Dead Zones and Harmful Algal Blooms” (Los efectos: Zonas muertas y floraciones de algas nocivas), última modificación el 15 de enero de 2026, <https://www.epa.gov/nutrientpollution/effects-dead-zones-and-harmful-algal-blooms>.
- 33 Meredith M. Brehob et al., “Estimates of Lake Nitrogen, Phosphorus, and Chlorophyll-a Concentrations to Characterize Harmful Algal Bloom Risk Across the United States” (Estimaciones de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y clorofila-a en lagos para caracterizar el riesgo de floraciones de algas nocivas en los Estados Unidos), *Earth's Future* 12, n.º 8 (2024): e2024EF004493, <https://doi.org/10.1029/2024EF004493>; Melissa Denchak y Melanie Sturm, “Freshwater Harmful Algal Blooms 101” (Floraciones de algas nocivas en aguas dulces: conceptos básicos), NRDC, 28 de agosto de 2019, <https://www.nrdc.org/stories/freshwater-harmful-algal-blooms-101>.
- 34 EPA, “The Effects.”
- 35 Daniel L. Hernández et al., “Nitrogen Pollution Is Linked to U.S. Listed Species Declines” (La contaminación por nitrógeno está vinculada a la disminución de las especies protegidas en los EE. UU.), *Bioscience* 66, n.º 3 (2016): 213-222, <https://doi.org/10.1093/biosci/biw003>.
- 36 Mark E. Fenn et al., “Ecological Effects of Nitrogen Deposition in the Western United States” (Efectos ecológicos de la deposición de nitrógeno en el oeste de los Estados Unidos), *Bioscience* 53, n.º 4 (2003): 404-420, [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0404:EEONDI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0404:EEONDI]2.0.CO;2).
- 37 Christopher M. Clark et al., “Nitrogen Deposition and Terrestrial Biodiversity” (Deposición de nitrógeno y biodiversidad terrestre), en *Encyclopedia of Biodiversity*, 2.º ed., vol. 5 (Elsevier, 2013), https://www.fs.usda.gov/psw/publications/fenn/psw_2013_fenn002_clark.pdf.
- 38 EPA, “Basic Information About NO₂” (Información básica sobre el NO₂), última modificación el 10 de julio de 2025, <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>.
- 39 Belanger et al., “Household Levels of Nitrogen Dioxide and Pediatric Asthma Severity” (Niveles de dióxido de nitrógeno en los hogares y gravedad del asma pediátrica); Fluegge and Fluegge, “Air Pollution and Risk of Hospitalization for Epilepsy” (Contaminación del aire y riesgo de hospitalización por epilepsia).
- 40 Maya Almaraz et al., “Agriculture Is a Major Source of NO_x Emissions in California” (La agricultura es una fuente importante de emisiones de NO_x en California), *Science Advances* 4, n.º 1 (2018), <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aao3477#core-collateral-R12>.
- 41 Lorenzo Rosa y Paolo Gabrielli, “Energy and Food Security Implications of Transitioning Synthetic Nitrogen Fertilizers to Net-Zero Emissions” (Implicaciones para la seguridad energética y alimentaria de la transición de los fertilizantes nitrogenados sintéticos hacia emisiones netas cero), *Environmental Research Letters* 18 (diciembre de 2022), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca815>.
- 42 Babita Aryal et al., “Nitrous Oxide Emission in Altered Nitrogen Cycle and Implications for Climate Change” (Emisión de óxido nitroso en un ciclo del nitrógeno alterado e implicaciones para el cambio climático) *Environmental Pollution* 314 (diciembre de 2022): 120272, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120272>.
- 43 Yunhu Gao y André Cabrera Serrenho, “Greenhouse Gas Emissions from Nitrogen Fertilizers Could Be Reduced by up to One-Fifth of Current Levels by 2050 with Combined Interventions” (Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los fertilizantes nitrogenados podrían reducirse hasta en una quinta parte de los niveles actuales para 2050 mediante intervenciones combinadas), *Nature Food* 4, n.º 2 (2023): 2, <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00698-w>; Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (PNUMA) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO), *Global Nitrous Oxide Assessment* (Evaluación global del óxido nitroso), 2024, <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/46562>.

- 44 EPA, *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2022* (Inventario de emisiones y sumideros de gases de efecto invernadero de los EE. UU.: 1990-2022).
- 45 Greenhouse Gas Protocol, “IPCC Global Warming Potential Values” (Valores de potencial de calentamiento global del IPCC).
- 46 Andrew Hultgren et al., “Impacts of Climate Change on Global Agriculture Accounting for Adaptation” (Impactos del cambio climático en la agricultura global considerando la adaptación), *Nature* 642, n.º 8068 (2025): 644-652, <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09085-w>; EPA, “Climate Change Impacts on Agriculture and Food Supply” (Impactos del cambio climático en la agricultura y el suministro de alimentos), 19 de octubre de 2022, <https://web.archive.org/web/20250430064208/https://www.epa.gov/climateimpacts/climate-change-impacts-agriculture-and-food-supply>.
- 47 A. R. Ravishankara, John S. Daniel y Robert W. Portmann, “Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century” (Óxido nitroso (N₂O): la sustancia dominante que agota el ozono emitida en el siglo XXI), *Science* 326, n.º 5949 (2009): 123-125, <https://doi.org/10.1126/science.1176985>.
- 48 PNUMA y FAO, *Global Nitrous Oxide Assessment* (Evaluación global de óxido nitroso).
- 49 PNUMA y FAO, *Global Nitrous Oxide Assessment* (Evaluación global de óxido nitroso).
- 50 EPA, *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2022* (Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y sumideros de los EE. UU.: 1990-2022), 2024, https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/us-ghg-inventory-2024-main-text_04-18-2024.pdf.
- 51 Kristin Honeycutt et al., *Alternative Water Supply Options for Nitrate Contamination: Addressing Nitrate in California's Drinking Water with a Focus on Tulare Lake Basin and Salinas Valley Groundwater* (Opciones alternativas de suministro de agua para la contaminación por nitratos: abordaje del nitrato en el agua potable de California con un enfoque en la cuenca del lago Tulare y el agua subterránea del valle de Salinas), Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos de California, julio de 2012, Informe técnico n.º 7, 1-150.
- 52 Roberto Mosheim y Marc Ribaud, “Costs of Nitrogen Runoff for Rural Water Utilities: A Shadow Cost Approach” (Costos de la escorrentía de nitrógeno para los servicios públicos de agua rural: un enfoque de costos sombra), *Land Economics* 93, n.º 1 (2017): 12-39, <https://doi.org/10.3368/le.93.1.12>.
- 53 Daniel J. Sobota et al., “Cost of Reactive Nitrogen Release from Human Activities to the Environment in the United States” (Costo de la liberación de nitrógeno reactivo de actividades humanas al medioambiente en los Estados Unidos), *Environmental Research Letters* 10, n.º 2 (2015): 025006, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/025006>.
- 54 Omanjana Goswami y Precious Tshabalala, *Less Fertilizer, Better Outcomes: USDA Conservation Programs Benefit Both Farmers and the Planet* (Menos fertilizante, mejores resultados: los programas de conservación del USDA benefician tanto a los agricultores como al planeta), Union of Concerned Scientists, 2026, <https://doi.org/10.47923/2026.16101>.
- 55 Gemma Del Rossi et al., “The Economics of Nutrient Pollution from Agriculture” (La economía de la contaminación por nutrientes proveniente de la agricultura), *Annual Review of Resource Economics* 15 (2023): 105-130, <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-111820-021317>.
- 56 Bonnie L. Keeler y Stephen Polasky, “Land-Use Change and Costs to Rural Households: A Case Study in Groundwater Nitrate Contamination” (Cambio en el uso de la tierra y costos para los hogares rurales: un estudio de caso sobre la contaminación por nitratos en aguas subterráneas), *Environmental Research Letters* 9, n.º 7 (2014): 074002, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/7/074002>.
- 57 Rajiv Khera et al., “Estimating Costs for Nitrate and Perchlorate Treatment for Small Drinking Water Systems” (Estimación de los costos de tratamiento de nitratos y perclorato para pequeños sistemas de agua potable), *AWWA Water Science* 3, n.º 2 (2021), <https://doi.org/10.1002/aws2.1224>; Keiser et al., “Gross External Damages of Water Pollution in the United States” (Daños externos totales causados por la contaminación del agua en los Estados Unidos).
- 58 “Des Moines Water Works Nitrate Lawsuit Ends” (Concluye la demanda de Des Moines Water Works por los nitratos), *Farm Progress*, 21 de abril de 2017, <https://www.farmprogress.com/conservation-and-sustainability/des-moines-water-works-nitrate-lawsuit-ends>.
- 59 Jacobs, “Ohio ACEC reconoce a la planta de agua de Dublin Road con el Gran Premio” (La ACEC de Ohio otorga su máximo galardón a la Planta de Agua de Dublin Road), comunicado de prensa, 10 de junio de 2019, <https://www.jacobs.com/newsroom/news/ohio-acec-recognizes-dublin-road-water-plant-grand-award>.
- 60 Mosheim y Ribaud, “Costs of Nitrogen Runoff for Rural Water Utilities” (Costos de la escorrentía de nitrógeno para los servicios públicos de agua rural).
- 61 Rachel Cramer, “Nitrate Levels Remain High in Central Iowa Rivers. Here's a Look at How Water Is Tested and Treated Before the Tap” (Los niveles de nitrato siguen siendo elevados en los ríos del centro de Iowa. Así se analiza y trata el agua antes de que llegue al grifo), Iowa Public Radio, 25 de junio de 2025, <https://www.iowapublicradio.org/ipr-news/2025-06-25/nitrate-levels-central-iowa-water-des-moines>; Central Iowa Water Works, “Lawn Watering Banned Immediately” (Se prohíbe inmediatamente el riego del césped), 12 de junio de 2025, <https://www.ciww.gov/news-1/ciww-issues-lawn-watering-ban-effective-immediately>.
- 62 Mosheim y Ribaud, “Costs of Nitrogen Runoff for Rural Water Utilities” (Costos de la escorrentía de nitrógeno para los servicios públicos de agua rural); Khera et al., “Estimating Costs for Nitrate and Perchlorate Treatment” (Estimación de los costos de tratamiento de nitratos y perclorato).
- 63 Mosheim y Ribaud, “Costs of Nitrogen Runoff for Rural Water Utilities” (Costos de la escorrentía de nitrógeno para los servicios públicos de agua rural); Nina Elkadi, “Across Farm Country, Fertilizer Pollution Impacts Not Just Health, but Water Costs, Too” (En todo el país agrícola, la contaminación por fertilizantes afecta no solo la salud, sino también los costos del agua), *Civil Eats*, 1.º de mayo de 2024, <https://civileats.com/2024/05/01/across-farm-country-fertilizer-pollution-impacts-not-just-health-but-water-costs-too/>.
- 64 Kristyn Abhold et al., *2025 Drinking Water Needs Assessment* (Evaluación de las necesidades de agua potable de 2025), Junta Estatal de Control de los Recursos Hídricos de California, junio de 2025, https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/needs/2025needsassessment.pdf.
- 65 Junta Regional de Control de Calidad del Agua de la Costa Central de California, “General Waste Discharge Requirements” (Requisitos generales de descarga de residuos), anexo A; Neil M. Dubrovsky y Pixie A. Hamilton, “Nutrients in the Nation's Streams and Groundwater: National Findings and Implications” (Nutrientes en los cursos de agua y las aguas subterráneas de la nación: hallazgos e implicaciones nacionales), Servicio Geológico de los EE. UU., Hoja informativa n.º 2010-3078, 23 de septiembre de 2010, <https://pubs.usgs.gov/fs/2010/3078/>; Ronnie Levin et al., “U.S. Drinking Water Quality: Exposure Risk Profiles for Seven Legacy and Emerging Contaminants” (Calidad del agua potable en los Estados Unidos: perfiles de riesgo de exposición para siete contaminantes tradicionales y emergentes), *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 34, n.º 1 (2024): 3-22, <https://doi.org/10.1038/s41370-023-00597-z>; Keeler y Polasky, “Land-Use Change and Costs to Rural Households” (Cambio en el uso de la tierra y costos para los hogares rurales).
- 66 Balazs et al., “Social Disparities in Nitrate-Contaminated Drinking Water” (Disparidades sociales en el agua potable contaminada con nitrato).
- 67 Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos de California, *Plan de gastos de fondos del año fiscal 2025-26*, junio de 2025, 1-91, https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/grants_loans/docs/2025/fy2025-26-fep-final-1125.pdf.
- 68 División de Agua Potable, “Drinking Water - SAFER Dashboard Failing and At-Risk Drinking Water Systems” (Agua potable: Panel SAFER; sistemas de agua potable en condición de falla y en riesgo), Portal de Datos Abiertos de California, consultado el 20 de noviembre de 2025, <https://data.ca.gov/dataset/safer-failing-and-at-risk-drinking-water-systems>.
- 69 Juliet Christian-Smith et al., *Assessing Water Affordability: A Pilot Study in Two Regions of California* (Evaluación de la asequibilidad del agua: un estudio piloto en dos regiones de California), Pacific Institute, 2013, <https://pacinst.org/wp-content/uploads/2013/08/assessing-water-affordability-1.pdf>; Aya Hashi y Jesse Morris, “As Toxins Taint Central Valley Water, Community and Political Leaders Face Uphill Battle” (Mientras las toxinas contaminan el agua del Valle Central, los líderes comunitarios y políticos enfrentan una dura batalla), *Fresnoland*, 17 de octubre de 2023, <https://fresnoland.org/2023/10/17/unsafe-water/>.

- 70 Departamento de Agricultura de Minnesota, “Minnesota Nitrogen Fertilizer Management Plan” (Plan de gestión de fertilizantes nitrogenados de Minnesota), consultado el [4/5/2026], <https://www.mda.state.mn.us/pesticide-fertilizer/minnesota-nitrogen-fertilizer-management-plan>.
- 71 Keeler y Polasky, “Land-Use Change and Costs to Rural Households” (Cambio en el uso de la tierra y costos para los hogares rurales).
- 72 Yanan Liu y H. Allen Klaiber, “Don’t Drink the Water! The Impact of Harmful Algal Blooms on Household Averting Expenditure” (¡No bebas el agua! El impacto de las floraciones nocivas de algas en los gastos de prevención de los hogares), *Environmental and Resource Economics* 86, n.º 1 (2023): 29-55, <https://doi.org/10.1007/s10640-023-00786-2>.
- 73 EPA, *National Lakes Assessment* (Evaluación nacional de los Lagos).
- 74 Rossi et al., “The Economics of Nutrient Pollution from Agriculture” (La economía de la contaminación por nutrientes proveniente de la agricultura).
- 75 Keiser et al., “Gross External Damages of Water Pollution in the United States” (Daños externos totales de la contaminación del agua en los Estados Unidos).
- 76 Rebecca Boehm, *Reviving the Dead Zone: Solutions to Benefit Both Gulf Coast Fishers and Midwest Farmers* (Revivir la zona muerta: soluciones para beneficiar tanto a los pescadores de la Costa del Golfo como a los agricultores del Medio Oeste), Union of Concerned Scientists, 2020, <https://www.ucs.org/sites/default/files/2020-06/reviving-the-dead-zone.pdf>.
- 77 Anne Schechinger, “The High Cost of Algae Blooms in U.S. Waters” (El alto costo de las floraciones de algas en las aguas de los EE. UU.), Environmental Working Group, 26 de agosto de 2020, <https://www.ewg.org/research/high-cost-of-algae-blooms>.
- 78 Schechinger, “The High Cost of Algae Blooms in U.S. Waters” (El alto costo de las floraciones de algas en las aguas de los EE. UU.).
- 79 Shelia Hu, “The Clean Water Act 101” (La Ley de Agua Limpia: conceptos básicos), NRDC, 17 de noviembre de 2025, <https://www.nrdc.org/stories/clean-water-act-101>; Erik D. Olson, “50th Anniversary of the Safe Drinking Water Act: Why Isn’t Drinking Water Safer?” (50.º aniversario de la Ley de Agua Potable Segura: ¿Por qué el agua potable no es más segura?), NRDC, 16 de diciembre de 2024, <https://www.nrdc.org/bio/erik-d-olson/50th-anniversary-safe-drinking-water-act-why-isnt-drinking-water-safer>.
- 80 Laura Gatz, “The Clean Water Act at Fifty: Highlights and Lessons Learned from a Half Century of Transformative Legislation” (La Ley de Agua Limpia en su 50.º aniversario: aspectos destacados y lecciones aprendidas de medio siglo de legislación transformadora), declaración ante el Comité de Transporte e Infraestructura, Subcomité de Recursos Hídricos y Medioambiente, Cámara de Representantes de los EE. UU., 20 de septiembre de 2022, <https://www.congress.gov/crs-product/TE10079>.
- 81 Lisa Held, “The Field Report: The Clean Water Act Has Failed to Curb Ag Pollution” (El informe de campo: la Ley de Agua Limpia no ha logrado controlar la contaminación agrícola), *Civil Eats*, 22 de marzo de 2022, <https://civileats.com/2022/03/22/field-report-clean-water-act-regulations-curb-pollution-farms-cafos-runoff/>.
- 82 Held, “The Field Report” (El informe de campo).
- 83 Olson, “50th Anniversary of the Safe Drinking Water Act” (50.º aniversario de la Ley de Agua Potable Segura).
- 84 La EPA estableció originalmente el cronograma de MCL de nitrato como un estándar provisional en 1975, basado en una recomendación de 1962 del Servicio de Salud Pública de los EE. UU., y la agencia ratificó ese estándar sin cambios en 1991. El sitio web de revisión de seis años de la EPA incluye las revisiones de seis años 1, 2, 3 y 4: EPA, “Six-Year Review of Drinking Water Standards” (Revisión de seis años de los estándares de agua potable), última modificación el 22 de abril de 2026, <https://www.epa.gov/dwsixyearreview>.
- 85 Angelico Mendy y Peter S. Thorne, “Long-Term Cancer and Overall Mortality Associated with Drinking Water Nitrate in the United States” (Cáncer a largo plazo y mortalidad general asociados con el nitrato en el agua potable en los Estados Unidos), *Public Health* 228 (marzo de 2024): 82-84, <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2024.01.001>.
- 86 EPA, *Water Affordability Needs Assessment: Report to Congress* (Evaluación de necesidades de asequibilidad del agua: informe al Congreso), diciembre de 2024, <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-12/water-affordability-needs-assessment.pdf>.
- 87 Minnesota Center For Environmental Advocacy et al., “Petition for Emergency Action Pursuant to the Safe Drinking Water Act, 42 U.S.C. § 300i, to Protect the Citizens of the Karst Region of Minnesota from Imminent and Substantial Endangerment to Public Health Caused by Nitrate Contamination of Underground Sources of Drinking Water” (Petición de acción de emergencia conforme a la Ley de Agua Potable Segura, 42 U.S.C. § 300i, para proteger a los ciudadanos de la región cárstica de Minnesota de un peligro inminente y sustancial para la salud pública causado por la contaminación por nitratos de las fuentes subterráneas de agua potable), presentada ante la EPA, 24 de abril de 2023, <https://www.mncenter.org/sites/default/files/permalinks/42423-emergency-sdwa-petition-to-epa-with-exhibits.pdf>; Center For Food Safety, Friends of Toppenish Creek, and Food & Water Watch, “Petition for Emergency Action Under Section 1431 of the Safe Drinking Water Act to Protect Residents of the Lower Yakima Valley, Washington, from Imminent and Substantial Endangerment to Public Health Caused by Nitrate Contamination of Drinking Water Sources” (Petición de acción de emergencia conforme a la Sección 1431 de la Ley de Agua Potable Segura para proteger a los residentes del Valle Bajo de Yakima, Washington, frente a un peligro inminente y sustancial para la salud pública causado por la contaminación por nitratos en las fuentes de agua potable), presentada ante la EPA, 26 de octubre de 2021, https://www.centerforfoodsafety.org/files/20211026-petition-for-emergency-action-under-section-1431-of-the-sdwa_00006.pdf; Iowa Environmental Council et al., “Petition for Emergency Action Pursuant to the Safe Drinking Water Act, 42 U.S.C. § 300i, to Protect the Citizens of the Karst Region of Iowa from Imminent and Substantial Endangerment to Public Health Caused by Nitrate Contamination of Underground Sources of Drinking Water” (Petición de acción de emergencia conforme a la Ley de Agua Potable Segura, 42 U.S.C. § 300i, para proteger a los ciudadanos de la región cárstica de Iowa frente a un peligro inminente y sustancial para la salud pública causado por la contaminación por nitratos en las fuentes subterráneas de agua potable), presentada ante la EPA, 2024, https://www.iaenvironment.org/webres/File/IA_SDWA_Petition_Complete.pdf; Allamakee County Protectors Education Campaign et al., “Coalition Letter to EPA: Use of Safe Drinking Water Act in Areas of High Nitrate Contamination” (Carta de coalición a la EPA: Uso de la Ley de Agua Potable Segura en áreas de alta contaminación con nitratos), WaterWatch, 29 de octubre de 2024, <https://waterwatch.org/coalition-letter-to-epa-regarding-utilization-of-federal-safe-drinking-water-act-in-areas-of-high-nitrate-contamination/>.
- 88 “Clean Water Infrastructure Financing: State and Local Perspectives and Recent Developments”, (Financiamiento de infraestructura de agua limpia: perspectivas estatales y locales y desarrollos recientes), Cámara de Representantes de los EE. UU., Comité de Transporte e Infraestructura, 28 de septiembre de 2023 (declaración de Rebecca Hammer), https://democrats-transportation.house.gov/imo/media/doc/rebecca_hammer_testimony.pdf.
- 89 Jonathan L. Ramseur, *Wastewater Infrastructure Funding: Background and Affordability Issues* (Financiamiento de infraestructura de aguas residuales: antecedentes y problemas de asequibilidad), Servicio de Investigación del Congreso, 2025, <https://www.congress.gov/crs-product/R48565>; “USGS Map infra figure 2”, en DeSimone, McMahon y Rosen, *The Quality of Our Nation’s Waters* (La calidad de las aguas de nuestra nación); Área de misión de recursos hídricos, “Predicted Concentrations of Nitrate in U.S. Groundwater” (Concentraciones previstas de nitrato en las aguas subterráneas de los EE. UU.), Servicio Geológico de los EE. UU., 2015, <https://www.usgs.gov/media/images/predicted-concentrations-nitrate-us-groundwater>.
- 90 Oficina de Presupuesto del Congreso, “Public Spending on Transportation and Water Infrastructure, 1956 to 2023” (Gasto público en infraestructura de transporte y agua, de 1956 a 2023), 26 de febrero de 2025, <https://www.cbo.gov/system/files/2025-02/60874-InfrastructureSpending.pdf>.
- 91 Coalición Nacional de Agricultura Sostenible, “Environmental Quality Incentives Program” (Programa de Incentivos de Calidad Ambiental), modificado por última vez en mayo de 2019, <https://sustainableagriculture.net/publications/grassrootsguide/conservation-environment/environmental-quality-incentives-program/>.

- 92 Facultad de Ciencias Agrícolas, del Consumidor y del Medioambiente, Universidad de Illinois Urbana-Champaign, “Wetlands Efficiently Remove Nitrogen Pollution from Surface Water, Leading to Cost Savings for Municipalities” (Los humedales eliminan eficientemente la contaminación por nitrógeno del agua superficial, lo que genera ahorros de costos para los municipios), comunicado de prensa, 28 de octubre de 2025, <https://www.newswise.com/articles/wetlands-efficiently-remove-nitrogen-pollution-from-surface-water-leading-to-cost-savings-for-municipalities>; Marin Skidmore y Nicole Karwowski, “Nature’s Kidneys: A Review of 35 Years of USDA Wetland Restoration” (Los riñones de la naturaleza: una revisión de 35 años de restauración de humedales del USDA), *Farmdoc Daily* 15, n.º 205 (2025): 1-4, <https://farmdocdaily.illinois.edu/2025/11/natures-kidneys-a-review-of-35-years-of-usda-wetland-restoration.html>.
- 93 Cathy Day y Michael Happ, “Closed Out: How U.S. Farmers Are Denied Access to Conservation Programs” (Clausurado: cómo los agricultores de los EE. UU. son privados del acceso a los programas de conservación), Coalición Nacional de Agricultura Sostenible, 14 de septiembre de 2021, <https://sustainableagriculture.net/blog/closed-out-how-u-s-farmers-are-denied-access-to-conservation-programs/>; Arohi Sharma, Lara Bryant y Ellen Lee, *Regenerative Agriculture: Farm Policy for the 21st Century* (Agricultura regenerativa: política agrícola para el siglo XXI), NRDC, 2022, <https://www.nrdc.org/sites/default/files/regenerative-agriculture-farm-policy-21st-century-report.pdf>.
- 94 Rebecca Schewe, “Broken Promises: Over 30,000 Farmers Denied Funds” (Promesas incumplidas: a más de 30 000 agricultores se les negaron fondos), Coalición Nacional de Agricultura Sostenible, 26 de febrero de 2025, <https://sustainableagriculture.net/blog/trump-denies-over-2-billion-in-payments-owed-to-30000-farmers/>.
- 95 Departamento de Agricultura de los EE. UU., Oficina del Inspector General, “U.S. Department of Agriculture Staffing Levels” (Niveles de personal del Departamento de Agricultura de los EE. UU.), 17 de diciembre de 2025, Informe de la OAI n.º 25-064-01, https://usdaoig.oversight.gov/sites/default/files/reports/2025-12/USDA%20Staffing%20Levels%20Final%20Report%20-%20Dec%202017_508-signed.pdf.
- 96 Sharma, Bryant y Lee, *Regenerative Agriculture* (Agricultura regenerativa).
- 97 Pheasants Forever, “President’s FY26 Budget Outline Slashes Funding for Ag Land Conservation” (El presupuesto del Presidente para el año fiscal 2026 recorta fondos destinados a la conservación de tierras agrícolas), comunicado de prensa, 2 de mayo de 2025, <https://www.pheasantsforever.org/Newsroom/2025-May/President%E2%80%99s-FY26-Budget-Outline-Slashes-Funding-for-Ag-Land-Conservation.aspx>.
- 98 Departamento de Agricultura de los EE. UU., Servicio de Conservación de Recursos Naturales, “Conservation Technical Assistance” (Asistencia técnica de conservación), consultado el [4/5/2026], <https://www.nrcs.usda.gov/getting-assistance/conservation-technical-assistance>.
- 99 JG Research and Evaluation, *Technical Assistance for Conservation: Landscape Report and Synthesis* (Asistencia técnica para la conservación: informe paisajístico y síntesis), Meridian Institute, 2024, https://merid.org/wp-content/uploads/2025/07/Technical_Assistance_Report_FINAL.pdf.
- 100 George R. Hallberg, “Nitrate in Ground Water in the United States” (Nitrato en aguas subterráneas en los Estados Unidos), en *Gestión de nitrógeno y protección del agua subterránea*, ed. R. F. Follett (Elsevier, 1989), <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-87393-4.50009-5>.
- 101 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, *2025 Minnesota Nutrient Reduction Strategy* (Estrategia de reducción de nutrientes de Minnesota 2025).
- 102 Sarah Porter y Anne Weir Schechinger, “Tap Water for 500,000 Minnesotans Contaminated with Elevated Levels of Nitrate” (El agua del grifo de 500 000 habitantes de Minnesota está contaminada con niveles elevados de nitrato), Environmental Working Group, 14 de enero de 2020, http://www.ewg.org/interactive-maps/2020_nitrate_in_minnesota_drinking_water_from_groundwater_sources/.
- 103 Departamento de Salud de Minnesota, “Minnesotans with Private Wells Urged to Test Their Drinking Water for Five Common Contaminants” (Se insta a los habitantes de Minnesota con pozos privados a analizar su agua potable en busca de cinco contaminantes frecuentes), comunicado de prensa, 11 de marzo de 2024, <https://www.health.state.mn.us/news/pressrel/2024/wellsprivate031124.html>.
- 104 Departamento de Salud de Minnesota, “Nitrate in Private Wells” (Nitrato en pozos privados), Acceso a datos de salud pública de Minnesota, 2021, https://data.web.health.state.mn.us/nitrate_wells.
- 105 Minnesota Center for Environmental Advocacy, “Protecting Drinking Water in Minnesota’s Karst Region from Industrial Agriculture Pollution” (Protección del agua potable en la región cárstica de Minnesota frente a la contaminación de la agricultura industrial), consultado el [4/5/2026], <https://www.mncenter.org/protecting-drinking-water-in-MNs-karst-region>.
- 106 Minnesota Center For Environmental Advocacy, “Protecting Drinking Water” (Protección del agua potable).
- 107 Temkin et al., “Exposure-Based Assessment” (Evaluación basada en la exposición).
- 108 Noelle Starling, “Accidental Guardians: How Reservoirs Are Decreasing Nitrogen and Phosphorus Loads Reaching Lake Winnipeg” (Guardianes accidentales: cómo los embalses están reduciendo las cargas de nitrógeno y fósforo que llegan al lago Winnipeg), Water Institute, Universidad de Waterloo, 7 de julio de 2025, <https://uwaterloo.ca/water-institute/news/accidental-guardians-how-reservoirs-are-decreasing-nitrogen>.
- 109 Philip Monson, *Aquatic Life Water Quality Standards Draft Technical Support Document for Nitrate* (Borrador del documento técnico de apoyo para los estándares de calidad del agua para la vida acuática respecto del nitrato), Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, 2022, <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-s6-13.pdf>.
- 110 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, *Nitrogen in Minnesota Surface Waters* (Nitrógeno en las aguas superficiales de Minnesota), junio de 2013, <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-s6-26a.pdf>.
- 111 Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, “Gulf of America ‘Dead Zone’ Below Average, Scientists Find” (Zona muerta del Golfo de América por debajo del promedio, según los científicos), comunicado de prensa, 31 de julio de 2025, <https://www.noaa.gov/news-release/gulf-of-america-dead-zone-below-average-scientists-find>.
- 112 Boehm, *Reviving the Dead Zone* (Revivir la zona muerta).
- 113 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, *Nitrogen in Minnesota Surface Waters* (Nitrógeno en las aguas superficiales de Minnesota).
- 114 Daniel Szmurlo y Benjamin M. Gramig, “2022 Census of Agriculture: Largest Increases in Tile-Drained Acreage Occurred in California’s Imperial County and Southern Minnesota” (Censo de Agricultura de 2022: los mayores aumentos en la superficie con drenaje subterráneo ocurrieron en el condado de Imperial, California, y el sur de Minnesota), Economic Research Service, Departamento de Agricultura de los EE. UU., 29 de julio de 2024, <https://www.ers.usda.gov/data-products/charts-of-note/chart-detail?chartId=109644>.
- 115 Patrick Belmont y Brenda DeZiel, “Replumbing Minnesota’s Landscape: How Agricultural Drainage Alters Rivers and Degrades Water Quality” (La reconfiguración del paisaje de Minnesota: cómo el drenaje agrícola altera los ríos y degrada la calidad del agua), Centro de Defensa Ambiental de Minnesota, 2025, <https://www.mncenter.org/sites/default/files/pdfs/MCEA-Replumbing-Minnesota-Spreads-072825.pdf>.
- 116 Goswami y Tshabalala, *Less Fertilizer, Better Outcomes* (Menos fertilizante, mejores resultados).
- 117 Timothy J. Griffis et al., “Nitrous Oxide Emissions Are Enhanced in a Warmer and Wetter World” (Las emisiones de óxido nítrico se incrementan en un mundo más cálido y húmedo), *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (45): 12081-12085, <https://doi.org/10.1073/pnas.1704552114>.
- 118 Estatutos de Minnesota 2025, cap. 103H, Protección de aguas subterráneas (2025), <https://www.revisor.mn.gov/statutes/cite/103H>.
- 119 Environmental Working Group, “Manure Overload” (Exceso de estiércol), 28 de mayo de 2020, <https://www.ewg.org/research/manure-overload>.

- 120 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota et al., *The Minnesota Nutrient Reduction Strategy* (Estrategia de reducción de nutrientes de Minnesota), septiembre de 2014, <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-s1-80.pdf>.
- 121 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, *2025 Minnesota Nutrient Reduction Strategy* (Estrategia de reducción de nutrientes de Minnesota 2025).
- 122 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, *2025 Minnesota Nutrient Reduction Strategy* (Estrategia de reducción de nutrientes de Minnesota 2025).
- 123 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, *2025 Minnesota Nutrient Reduction Strategy* (Estrategia de reducción de nutrientes de Minnesota 2025).
- 124 Maya Korb y J. P. Rose, “Voluntary Is Not Enough: States Need to Intervene to Address Nitrogen Pollution” (Lo voluntario no es suficiente: los estados deben intervenir para abordar la contaminación por nitrógeno), NRDC, 12 de septiembre de 2025, <https://www.nrdc.org/media/voluntary-not-enough-states-need-intervene-address-nitrogen-pollution>.
- 125 Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota, *2025 Minnesota Nutrient Reduction Strategy* (Estrategia de reducción de nutrientes de Minnesota 2025).
- 126 Bertrand Hirel et al., “Improving Nitrogen Use Efficiency in Crops for Sustainable Agriculture” (Mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno en cultivos para una agricultura sostenible), *Sustainability* 3, n.º 9 (2011): 1452-1485, <https://doi.org/10.3390/su3091452>.
- 127 Thomas Harter, “SBX2 1 Nitrate in Drinking Water: UC Davis ‘N Tracking Analysis’ to Estimate Potential Groundwater N Loading” (SBX2 1: nitrato en agua potable: análisis de seguimiento de nitrógeno de UC Davis para estimar la posible carga de nitrógeno en aguas subterráneas), Universidad de California, Davis, 2012, https://www.cdffa.ca.gov/is/fldrs/frep/pdfs/7_Harter_Mass_Balance_V2.pdf.
- 128 Edward C. Anton, Jeffrey L. Barnickol y Dean R. Schnaible, *Nitrate in Drinking Water: Report to the Legislature* (Nitrato en agua potable: informe a la Legislatura), Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos de California, 1988, Informe n.º 88-11WQ, https://www.waterboards.ca.gov/publications_forms/publications/legislative/docs/1999prior/8811wq1988.pdf.
- 129 Anton, Barnickol y Schnaible, *Nitrate in Drinking Water* (Nitrato en agua potable).
- 130 California S.B. 390, Calidad del agua (1999), http://www.leginfo.ca.gov/pub/99-00/bill/sen/sb_0351-0400/sb_390_bill_19991010_chaptered.html.
- 131 California S.B. 390.
- 132 Junta Regional de Agua de California Central Valley, “Irrigated Lands Regulatory Program” (Programa Regulador de Tierras Irrigadas), consultado el 22 de marzo de 2026, https://www.waterboards.ca.gov/centralvalley/water_issues/irrigated_lands/.
- 133 Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos de California, “2026 Aquifer Risk Map” (Mapa de riesgo de acuíferos 2026), consultado el [4/5/2026], <https://gispublic.waterboards.ca.gov/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=18c7d253f0a44fd2a5c7bcfb42cc158d>; Stewart et al., “Toward the Human Right to Water” (Hacia el derecho humano al agua).
- 134 Junta Regional de Control de Calidad del Agua de California, *Assessment of Interim Drinking Water Needs and Costs in Central Coast Areas Affected by Agricultural Nitrate Groundwater Contamination* (Evaluación de las necesidades y los costos provisionales de agua potable en las áreas de la Costa Central afectadas por la contaminación del agua subterránea con nitrato agrícola), agosto de 2025, 1-53.
- 135 Anne Weir Schechinger, “In California, Latinos More Likely to Be Drinking Nitrate-Polluted Water” (En California, los latinos tienen más probabilidades de beber agua contaminada con nitrato), Environmental Working Group, 7 de octubre de 2020, <http://www.ewg.org/interactive-maps/2020-california-latino-more-likely-drinking-nitrate-polluted-water/>.
- 136 Orden WQ 2018-0002, Junta Regional de Control de Calidad del Agua de California, Región del Valle Central (2018), https://www.waterboards.ca.gov/board_decisions/adopted_orders/water_quality/2018/wqo2018_0002_with_data_fig1_2_appendix_a.pdf.
- 137 Orden WQ 2018-0002.
- 138 Orden WQ 2018-0002, 81-82; East San Joaquin Water Quality Coalition, “Irrigation and Nitrogen Management Plan (INMP) Summary Report” (Informe resumido del Plan de Gestión del Riego y del Nitrógeno [Irrigation and Nitrogen Management Plan, INMP]), hoja de trabajo, 2026, <https://www.esjcoalition.org/pdf/INMPSummaryReportTemplate.pdf>.
- 139 “RE: Require the Central Valley Third-Party Coalitions to Submit Additional Data Analyses for the Second Statewide Agricultural Expert Panel” (Asunto: requerir a las coaliciones de terceros del Valle Central que presenten análisis de datos adicionales para el segundo panel estatal de expertos en agricultura), 11 de julio de 2025, <https://www.nrdc.org/sites/default/files/2026-03/coalition-letter-to-water-board-requesting-additional-coalition-analysis-from-central-valley-coalitions.pdf>.
- 140 Junta Regional de Control de Calidad del Agua de California, “General Waste Discharge Requirements” (Requisitos generales de descarga de residuos), anexo A.
- 141 S. Emily Grams y James Rehwaltdt, “Mandatory Fertilizer Regulations: A Survey of State and Federal Laws” (Regulaciones obligatorias sobre fertilizantes: encuesta de leyes estatales y federales), *William & Mary Environmental Law and Policy Review* 49, n.º 2 (2025): 299, <https://scholarship.law.wm.edu/wmelpr/vol49/iss2/2>.
- 142 Junta Regional de Control de Calidad del Agua de California, “General Waste Discharge Requirements” (Requisitos Generales de Descarga de Residuos).
- 143 Junta Regional de Control de Calidad del Agua de California, “General Waste Discharge Requirements” (Requisitos Generales de Descarga de Residuos) 147-148.
- 144 Eric Brennan, Ag Order 4.0 Regulation Resources and Research (Recursos de investigación y regulación de la Orden Agrícola 4.0), consultado el [4/5/2026], <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/salinas-ca/crop-improvement-and-protection-research/people/eric-b-brennan/ag-order-40-regulation-resources-and-research/#:~:text=Those%20credits%20caused%20a%20huge,Stay%20tuned>.
- 145 Orden WQ 2023-0081, Junta Regional de Control de Calidad del Agua de California, Región de la Costa Central (2023), https://www.waterboards.ca.gov/public_notices/petitions/water_quality/docs/2023/wqo2023-0081.pdf.
- 146 Carey Gillam, The New Lede, “Outrage in Iowa: Residents Demand Action to Clean up Dangerously Polluted Water” (Indignación en Iowa: los residentes exigen medidas para limpiar el agua peligrosamente contaminada), *Investigate Midwest*, 8 de agosto de 2025, <https://investigatemidwest.org/2025/08/08/outrage-in-iowa-residents-demand-action-to-clean-up-dangerously-polluted-water/>.
- 147 Daniel Rath, *Literature Review of Questions Assigned to the Expert Advisory Panel 2025* (Revisión bibliográfica de preguntas asignadas al panel de asesoramiento de expertos 2025), NRDC, 31 de julio de 2025, <https://www.nrdc.org/sites/default/files/2025-08/scientific-literature-review-of-nitrogen-related-limits.pdf>.
- 148 Sara Vero et al., “Review: The Environmental Status and Implications of the Nitrate Time Lag in Europe and North America” (Revisión: el estado ambiental y las implicaciones del retraso temporal del nitrato en Europa y América del Norte). *Hydrogeology Journal* 26 (1) (14 de agosto de 2017), <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1650-9>.
- 149 Korb y Rose, “Voluntary Is Not Enough” (Lo voluntario no es suficiente).
- 150 Santiago Tamagno et al., “Quantifying N Leaching Losses as a Function of N Balance: A Path to Sustainable Food Supply Chains” (Cuantificación de las pérdidas de lixiviación de N en función del balance de N: una vía hacia cadenas de suministro de alimentos sostenibles), *Agriculture, Ecosystems & Environment* 324 (febrero de 2022): 107714, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107714>.

- 151 Belmont y DeZiel, “Replumbing Minnesota’s Landscape” (La reconfiguración del paisaje de Minnesota).
- 152 J. C. Dlamini et al., “Riparian Buffer Strips Influence Nitrogen Losses as Nitrous Oxide and Leached N from Upslope Permanent Pasture” (Las franjas de protección ribereñas influyen en las pérdidas de nitrógeno como óxido nítrico y nitrógeno lixiviado desde pasturas permanentes en laderas ascendentes), *Agriculture, Ecosystems & Environment* 336 (septiembre de 2022): 108031, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108031>.
- 153 David R. Kanter et al., “Nitrogen Pollution Policy Beyond the Farm” (Política sobre la contaminación por nitrógeno más allá de la explotación agrícola), *Nature Food* 1 (2020): 27-32, <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0001-5>.
- 154 Shu Kee Lam et al., “Next-Generation Enhanced-Efficiency Fertilizers for Sustained Food Security” (Fertilizantes de próxima generación de eficiencia mejorada para una seguridad alimentaria sostenida), *Nature Food* 3 (2022): 575-580, <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00542-7>.
- 155 Universidad de Nueva York, “Applying Auto Industry’s Fuel-Efficiency Standards to Agriculture Could Net Billions in Corn Sector, Researchers Conclude” (Aplicar los estándares de eficiencia de combustible de la industria automotriz a la agricultura podría generar miles de millones en el sector del maíz, concluyen los investigadores), comunicado de prensa, 15 de octubre de 2018, <http://www.nyu.edu/content/nyu/en/about/news-publications/news/2018/october/applying-auto-industry-s-fuel-efficiency-standards-to-agriculture>; David R. Kanter y Timothy D. Searchinger, “A Technology-Forcing Approach to Reduce Nitrogen Pollution” (Un enfoque impulsado por la tecnología para reducir la contaminación por nitrógeno), *Nature Sustainability* 1 (2018): 544-552, <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0143-8>.
- 156 *Consejo de Defensa de Recursos Naturales v. EPA EE. UU.*, 808 F.3d 556, 563-564 (2nd. Cir. 2015).
- 157 Tingyu Li et al., “Enhanced-Efficiency Fertilizers Are Not a Panacea for Resolving the Nitrogen Problem” (Los fertilizantes de eficiencia mejorada no son una solución milagrosa para resolver el problema del nitrógeno), *Global Change Biology* 24, n.º 2 (2018): e511-e521, <https://doi.org/10.1111/gcb.13918>.
- 158 Dlamini et al., “Riparian Buffer Strips Influence Nitrogen Losses” (Las franjas de protección ribereñas influyen en las pérdidas de nitrógeno); D. B. Jaynes y T. M. Isenhardt, “Performance of Saturated Riparian Buffers in Iowa, USA” (Desempeño de franjas ribereñas saturadas en Iowa, EE. UU.), *Journal of Environmental Quality* 48, n.º 2 (2019): 289-296, <https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0115>; Sua Lee et al., “Denitrifying Woodchip Bioreactors: A Microbial Solution for Nitrate in Agricultural Wastewater—A Review” (Biorreactores de astillas de madera desnitrificantes: una solución microbiana para el nitrato en aguas residuales agrícolas: revisión), *Journal of Microbiology* 61, n.º 9 (2023): 791-805, <https://doi.org/10.1007/s12275-023-00067-z>.
- 159 Eric A. Davidson y David Kanter, “Inventories and Scenarios of Nitrous Oxide Emissions” (Inventarios y escenarios de emisiones de óxido nítrico), *Environmental Research Letters* 9, n.º 10 (2014): 105012, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105012>; PNUMA y FAO, *Global Nitrous Oxide Assessment* (Evaluación global del óxido nítrico); Hanqin Tian et al., “A Comprehensive Quantification of Global Nitrous Oxide Sources and Sinks” (Una cuantificación integral de las fuentes y sumideros globales de óxido nítrico), *Nature* 586 (2020): 248-256, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>.
- 160 Changsheng Li, Steve Frolking y Klaus Butterbach-Bahl, “Carbon Sequestration in Arable Soils Is Likely to Increase Nitrous Oxide Emissions, Offsetting Reductions in Climate Radiative Forcing” (El almacenamiento de carbono en suelos agrícolas probablemente aumente las emisiones de óxido nítrico, compensando las reducciones en el forzamiento radiativo del clima), *Climatic Change* 72, n.º 3 (2005): 321-338, <https://doi.org/10.1007/s10584-005-6791-5>.
- 161 Oficina de Presupuesto del Congreso, *Emissions of Greenhouse Gases in the Agriculture Sector* (Emisiones de gases de efecto invernadero en el sector agrícola), agosto de 2025, <https://www.cbo.gov/system/files/2025-08/61467-ghg-agriculture.pdf>.
- 162 General Mills, “General Mills Partners with Regrow Agriculture to Monitor Agriculture at Scale” (General Mills se asocia con Regrow Agriculture para monitorear la agricultura a escala), comunicado de prensa, 14 de junio de 2022, <https://www.generalmills.com/news/press-releases/general-mills-partners-with-regrow-agriculture-to-monitor-agriculture-at-scale>.
- 163 PNUMA y FAO, *Global Nitrous Oxide Assessment* (Evaluación global de óxido nítrico); Hanqin Tian et al., “Global Nitrous Oxide Budget (1980–2020)” (Presupuesto global de óxido nítrico [1980–2020]) *Earth System Science Data* 16, n.º 6 (2024): 2543-23604, <https://doi.org/10.5194/essd-16-2543-2024>; Tian et al., “A Comprehensive Quantification of Global Nitrous Oxide Sources and Sinks” (Una cuantificación integral de las fuentes y sumideros globales de óxido nítrico).
- 164 PNUMA y FAO, *Global Nitrous Oxide Assessment* (Evaluación global de óxido nítrico).
- 165 Todd S. Rosenstock et al., “Agriculture’s Contribution to Nitrate Contamination of Californian Groundwater (1945–2005)” (La contribución de la agricultura a la contaminación por nitratos del agua subterránea en California [1945–2005]) *Journal of Environmental Quality* 43, n.º 3 (2014): 895-907, <https://doi.org/10.2134/jeq2013.10.0411>; Bijay-Singh y Eric Craswell, “Fertilizers and Nitrate Pollution of Surface and Ground Water: An Increasingly Pervasive Global Problem” (Fertilizantes y contaminación por nitratos de aguas superficiales y subterráneas: un problema global cada vez más extendido), *SN Applied Sciences* 3 (2021): 518-541, <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>.
- 166 Thomas Tomich et al., *The California Nitrogen Assessment* (La evaluación del nitrógeno en California).
- 167 Jayash Paudel y Christine L. Crago, “Environmental Externalities from Agriculture: Evidence from Water Quality in the United States” (Externalidades ambientales de la agricultura: evidencia sobre la calidad del agua en los Estados Unidos), *American Journal of Agricultural Economics* 103, n.º 1 (2021): 185-210, <https://doi.org/10.1111/ajae.12130>.
- 168 Naomi E. Detenbeck, Mingde You y Daniel Torre, “Recent Changes in Nitrogen Sources and Load Components to Estuaries of the Contiguous United States” (Cambios recientes en las fuentes de nitrógeno y los componentes de carga hacia los estuarios de los Estados Unidos contiguos), *Estuaries and Coasts* 42, n.º 8 (2019): 2096-2113, <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00614-1>; Rosenstock et al., “Agriculture’s Contribution to Nitrate Contamination” (La contribución de la agricultura a la contaminación por nitratos); Bijay-Singh y Craswell, “Fertilizers and Nitrate Pollution of Surface and Ground Water” (Fertilizantes y contaminación por nitratos de aguas superficiales y subterráneas); Daniel J. Sobota, Jana E. Compton y John A. Harrison, “Reactive Nitrogen Inputs to U.S. Lands and Waterways: How Certain Are We About Sources and Fluxes?” (Aportes de nitrógeno reactivo a tierras y vías fluviales de los EE. UU.: ¿qué tan seguros estamos sobre las fuentes y los flujos?), *Frontiers in Ecology and the Environment* 11, n.º 2 (2013): 82-90, <https://doi.org/10.1890/110216>.
- 169 Xin Zhang et al., “Managing Nitrogen for Sustainable Development” (Gestión del nitrógeno para el desarrollo sostenible) *Nature* 528 (2015): 51-59, <https://doi.org/10.1038/nature15743>.
- 170 Griesheim et al., “Nitrogen-15 Evaluation of Fall-Applied Anhydrous Ammonia” (Evaluación de nitrógeno-15 del amoníaco anhidro aplicado en otoño); Gardner y Drinkwater, “The Fate of Nitrogen in Grain Cropping Systems” (El destino del nitrógeno en sistemas de cultivo de granos); Tomich et al., *California Nitrogen Assessment* (La evaluación del nitrógeno en California).
- 171 Marc Ribaud, “Reducing Agriculture’s Nitrogen Footprint: Are New Policy Approaches Needed?” (Reducción de la huella de nitrógeno de la agricultura: ¿se necesitan nuevos enfoques de políticas?), *Amber Waves: The Economics of Food, Farming, Natural Resources, and Rural America* (La economía de la alimentación, la agricultura, los recursos naturales y la América rural) (2011): 34-39, <https://doi.org/10.22004/ag.econ.121012>.
- 172 Eric D. Roy, Courtney R. Hammond Wagner y Meredith T. Niles, “Hot Spots of Opportunity for Improved Cropland Nitrogen Management Across the United States” (Puntos críticos de oportunidad para mejorar la gestión del nitrógeno en cultivos de los Estados Unidos), *Environmental Research Letters* 16, n.º 3 (2021): 035004, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd662>.

- 173 Rebecca J. Frei et al., “Limited Progress in Nutrient Pollution in the U.S. Caused by Spatially Persistent Nutrient Sources” (Progreso limitado en la contaminación por nutrientes en los EE. UU. causado por fuentes de nutrientes espacialmente persistentes), *PLOS One* 16, n.º 11 (2021): e0258952, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258952>.
- 174 Matthew Houser, “Farmer Motivations for Excess Nitrogen Use in the U.S. Corn Belt” (Motivaciones de los agricultores para el uso excesivo de nitrógeno en el Corn Belt de los EE. UU.), *Case Studies in the Environment* 6, n.º 1 (2022): 1688823, <https://doi.org/10.1525/cse.2022.1688823>.
- 175 Sarah C. Sellars, Gary D. Schnitkey y Laura F. Gentry, “Do Illinois Farmers Follow University-Based Nitrogen Recommendations?” (¿Siguen los agricultores de Illinois las recomendaciones de nitrógeno basadas en la universidad?), artículo presentado en la Reunión Anual de la Agricultural & Applied Economics Association, Kansas City, Missouri, del 26 al 28 de julio de 2020, <https://doi.org/10.22004/ag.econ.304617>.
- 176 J. Gordon Arbuckle Jr. y Hanna Rosman, *Iowa Farmers’ Nitrogen Management Practices and Perspectives* (Prácticas y perspectivas de gestión del nitrógeno de los agricultores de Iowa), Universidad Estatal de Iowa, 2014, <https://dr.lib.iastate.edu/server/api/core/bitstreams/3b3a3587-1311-42ad-8456-528d8f683df7/content>.
- 177 Matthew Houser y Diana Stuart, “An Accelerating Treadmill and an Overlooked Contradiction in Industrial Agriculture: Climate Change and Nitrogen Fertilizer” (Una cinta de correr acelerada y una contradicción pasada por alto en la agricultura industrial: cambio climático y fertilizante nitrogenado), *Journal of Agrarian Change* 20, n.º 2 (2020): 215-237, <https://doi.org/10.1111/joac.12341>.
- 178 E. Sinha, A. M. Michalak y V. Balaji, “Eutrophication Will Increase During the 21st Century as a Result of Precipitation Changes” (La eutrofización aumentará durante el siglo XXI como resultado de los cambios en la precipitación), *Science* 357, n.º 6349 (2017): 405-408, <https://doi.org/10.1126/science.aan2409>.
- 179 Rebecca L. Schewe y Diana Stuart, “Why Don’t They Just Change? Contract Farming, Informational Influence, and Barriers to Agricultural Climate Change Mitigation” (¿Por qué no cambian simplemente? Agricultura por contrato, influencia informativa y barreras para la mitigación del cambio climático agrícola), *Rural Sociology* 82, n.º 2 (2016): 226-262, <https://doi.org/10.1111/ruso.12122>; D. Stuart, R. L. Schewe y M. McDermott, “Reducing Nitrogen Fertilizer Application as a Climate Change Mitigation Strategy: Understanding Farmer Decision-Making and Potential Barriers to Change in the U.S.” (Reducción de la aplicación de fertilizantes nitrogenados como estrategia de mitigación del cambio climático: comprensión de la toma de decisiones de los agricultores y las posibles barreras para el cambio en los EE. UU.), *Land Use Policy* 36 (enero de 2014): 210-218, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.08.011>; Joshua D. Woodard y Scott Marlow, *Crop Insurance, Credit, and Conservation* (Seguro agrícola, crédito y conservación), AGree, abril de 2017, <https://foodandagpolicy.org/wp-content/uploads/2025/08/2017-April-Crop-Insurance-Credit-and-Conservation.pdf>.
- 180 Mehmood Ali Noor et al., “Small Farmers and Sustainable N and P Management: Implications and Potential Under Changing Climate” (Pequeños agricultores y gestión sostenible de nitrógeno y fósforo: implicaciones y potencial bajo un clima cambiante), en *Ciclo de carbono y nitrógeno en el suelo*, eds. Rahul Datta et al. (Springer, 2020), https://doi.org/10.1007/978-981-13-7264-3_6.
- 181 Noor et al., “Small Farmers and Sustainable N and P Management” (Pequeños agricultores y gestión sostenible de nitrógeno y fósforo).
- 182 Houser, “Farmer Motivations for Excess Nitrogen Use in the U.S. Corn Belt” (Motivaciones de los agricultores para el uso excesivo de nitrógeno en el Corn Belt de los EE. UU.), Paul V. Preckel et al., “Contract Incentives and Excessive Nitrogen Use in Agriculture” (Incentivos contractuales y uso excesivo de nitrógeno en la agricultura), *Journal of Agricultural and Resource Economics* 25, n.º 2 (2000): 468-484, <https://www.jstor.org/stable/40987071>.
- 183 Houser, “Farmer Motivations for Excess Nitrogen Use in the U.S. Corn Belt” (Motivaciones de los agricultores para el uso excesivo de nitrógeno en el Corn Belt de los EE. UU.); Glenn Sheriff, “Efficient Waste? Why Farmers Over-Applied Nutrients and the Implications for Policy Design” (¿Residuos eficientes? Por qué los agricultores aplican en exceso nutrientes y las implicaciones para el diseño de políticas), *Review of Agricultural Economics* 27, n.º 4 (2005): 542-557, <https://doi.org/10.1111/j.1467-9353.2005.00263.x>.
- 184 Houser, “Farmer Motivations for Excess Nitrogen Use in the U.S. Corn Belt” (Motivaciones de los agricultores para el uso excesivo de nitrógeno en el Corn Belt de los EE. UU.).
- 185 David J. Pannell, “Economic Perspectives on Nitrogen in Farming Systems: Managing Trade-Offs Between Production, Risk and the Environment” (Perspectivas económicas sobre el nitrógeno en los sistemas agrícolas: gestión de compensaciones entre producción, riesgo y medioambiente), *Soil Research* 55, n.º 6 (2017): 473-478, <https://doi.org/10.1071/SR16284>.
- 186 Risk Management Agency, “USDA Announces Details of New Insurance Option for Conservation-Minded Corn Farmers” (El USDA anuncia detalles de nueva opción de seguro para agricultores de maíz comprometidos con la conservación), comunicado de prensa, consultado el 24 de diciembre de 2025, <https://web.archive.org/web/20250502150247/https://www.rma.usda.gov/news-events/news/2022/washington-dc/usda-announces-details-new-insurance-option-conservation-minded>.
- 187 AGree, “Conservation Practices and the Federal Crop Insurance Program (FCIP)” (Prácticas de conservación y el Programa Federal de Seguro de Cultivos [Federal Crop Insurance Program, FCIP]), mayo de 2022, <https://foodandagpolicy.org/wp-content/uploads/2025/08/Conservation-Practices-and-FCIP-Barriers-6.2.22.pdf>.
- 188 Woodard and Marlow, *Crop Insurance, Credit, and Conservation* (Seguro de cultivos, crédito y conservación).
- 189 Servicio de Investigación Económica, “Risk Management - Glossary” (Gestión de riesgos - Glosario), Departamento de Agricultura de los EE. UU., última modificación el 3 de septiembre de 2025, <https://www.ers.usda.gov/topics/farm-practices-management/risk-management/glossary>; Departamento de Agricultura de los EE. UU., Federal Crop Insurance Corporation, *Good Farming Practices Standards Handbook* (Manual de estándares de buenas prácticas agrícolas), 2024, FCIC-14060, <https://www.rma.usda.gov/sites/default/files/2024-12/2025-14060-Good-Farming-Practice-Determination-Standards.pdf>.
- 190 Tim Fink, “AFT Applauds USDA’s Risk Management Agency for Recognizing NRCS Conservation Practices as ‘Good Farming Practices’” (La AFT aplaude a la Agencia de Gestión de Riesgos del USDA por reconocer las prácticas de conservación del NRCS como “buenas prácticas agrícolas”), American Farmland Trust, 7 de diciembre de 2023, <https://farmland.org/blog/aft-applauds-usdas-risk-management-agency-for-recognizing-nrcs-conservation-practices-as-good-farming-practices>; National Sustainable Agriculture Coalition, “Release: USDA Updates Good Farming Practice Definition, Strengthening Support for Conservation Practice Adoption” (Comunicado: El USDA actualiza la definición de buenas prácticas agrícolas, fortaleciendo el apoyo para la adopción de prácticas de conservación), comunicado de prensa, 6 de diciembre de 2023, <https://sustainableagriculture.net/blog/release-usda-updates-good-farming-practice-definition-strengthening-support-for-conservation-practice-adoption/>.
- 191 Schewe y Stuart, “Why Don’t They Just Change?” (¿Por qué no solo cambian?).
- 192 Schewe y Stuart, “Why Don’t They Just Change?” (¿Por qué no solo cambian?).
- 193 Jack Schieffer y Michael Vassalos, “Risk and the Use of Contracts by Vegetable Growers” (Riesgo y el uso de contratos por parte de los productores de hortalizas), *Choices*, 2015, <https://www.choicesmagazine.org/choices-magazine/theme-articles/current-issues-in-agricultural-contracts/risk-and-the-use-of-contracts-by-vegetable-growers>.
- 194 James M. MacDonald et al., *Contracts, Markets, and Prices: Organizing the Production and Use of Agricultural Commodities* (Contratos, mercados y precios: organización de la producción y el uso de productos agrícolas básicos), Economic Research Service, Departamento de Agricultura de los EE. UU., 2004, <https://doi.org/10.2139/ssrn.754986>.

- 195 Kristina Beethem et al., “Navigating the Information Landscape: Public and Private Information Source Access by Midwest Farmers” (Navegando el panorama de la información: acceso a fuentes de información públicas y privadas por parte de agricultores del Medio Oeste), *Agriculture and Human Values* 40, n.º 3 (2023): 1117-1135, <https://doi.org/10.1007/s10460-022-10411-5>; D. Stuart et al., “Farmer Selection of Sources of Information for Nitrogen Management in the U.S. Midwest: Implications for Environmental Programs” (Selección de fuentes de información por parte de agricultores para la gestión del nitrógeno en el Medio Oeste de los EE. UU.: implicaciones para programas ambientales), *Land Use Policy* 70 (enero de 2018): 289-297, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.047>; M. Houser et al., “Farmers, Information, and Nutrient Management in the U.S. Midwest” (Agricultores, información y gestión de nutrientes en el Medio Oeste de los EE. UU.), *Journal of Soil and Water Conservation* 74, n.º 3 (2019): 269-280, <https://doi.org/10.2489/jswc.74.3.269>; Diana Stuart y Matthew Houser, “Producing Compliant Polluters: Seed Companies and Nitrogen Fertilizer Application in U.S. Corn Agriculture” (Produciendo contaminadores conformes: empresas de semillas y la aplicación de fertilizante nitrogenado en la agricultura del maíz en los EE. UU.), *Rural Sociology* 83, n.º 4 (2018): 857-881, <https://doi.org/10.1111/ruso.12212>; Diana Stuart, “Input Industry Influence on Farmer Decision-Making: An Example of Negative Impacts to the Environment and Farmers” (Influencia de la industria de insumos en la toma de decisiones de los agricultores: un ejemplo de impactos negativos en el medioambiente y los agricultores), en el *Manual sobre el impacto humano de la agricultura*, ed. Harvey S. James Jr. (Edward Elgar Publishing, 2021), <https://www.elgaronline.com/display/edcoll/9781839101731/9781839101731.00012.xml>.
- 196 Stuart et al., “Farmer Selection of Sources of Information” (Selección de fuentes de información por parte de los agricultores).
- 197 Sharma, Bryant y Lee, *Regenerative Agriculture* (Agricultura regenerativa).
- 198 Roy, Wagner y Niles, “Hot Spots of Opportunity” (Puntos críticos de oportunidad).
- 199 Bruno Basso et al., “Yield Stability Analysis Reveals Sources of Large-Scale Nitrogen Loss from the U.S. Midwest” (El análisis de estabilidad del rendimiento revela fuentes de pérdida de nitrógeno a gran escala del Medio Oeste de los EE. UU.), *Scientific Reports* 9, n.º 1 (2019): 5774, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42271-1>; S. Sela et al., “Adapt-N Outperforms Grower-Selected Nitrogen Rates in Northeast and Midwestern United States Strip Trials” (Adapt-N supera las tasas de nitrógeno seleccionadas por el agricultor en ensayos en franjas en el noreste y el Medio Oeste de los Estados Unidos), *Agronomy Journal* 108, n.º 4 (2016): 1726-1734, <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0606>; Stefan Gailans, “Can We Reduce N Rates to Corn and Improve ROI?” (¿Podemos reducir las tasas de N para el maíz y mejorar el ROI?), Practical Farmers of Iowa, 16 de junio de 2024, <https://practicalfarmers.org/research/can-we-reduce-n-rates-to-corn-and-improve-roi/>.
- 200 Helio Antonio Wood Joris et al., “Long-Term N Fertilization Reduces Uptake of N from Fertilizer and Increases the Uptake of N from Soil” (La fertilización de N a largo plazo reduce la captación de N del fertilizante y aumenta la captación de N del suelo), *Scientific Reports* 10 (2020): 18834, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75971-0>.
- 201 Zhibiao Wei et al., “Organic Inputs to Reduce Nitrogen Export via Leaching and Runoff: A Global Meta-Analysis” (Aportes orgánicos para reducir la exportación de nitrógeno a través de la lixiviación y la escorrentía: un metaanálisis global), *Environmental Pollution* 291 (diciembre de 2021): 118176, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118176>.
- 202 Caela O’Connell y D. L. Osmond, “Why Soil Testing Is Not Enough: A Mixed Methods Study of Farmer Nutrient Management Decision-Making Among U.S. Producers” (Por qué las pruebas de suelo no son suficientes: un estudio de métodos mixtos sobre la toma de decisiones de los agricultores respecto a la gestión de nutrientes entre productores de los EE. UU.), *Journal of Environmental Management* 314 (julio de 2022): 115027, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115027>.
- 203 Brad Carlson, “Are You Overspending on Fertilizer?” (¿Está gastando en exceso en fertilizantes?), *Minnesota Crop News* (blog), Universidad de Minnesota, 24 de abril de 2024, <https://blog-crop-news.extension.umn.edu/2024/04/are-you-overspending-on-fertilizer.html>.
- 204 Timothy M. Bowles et al., “Addressing Agricultural Nitrogen Losses in a Changing Climate” (Abordar las pérdidas de nitrógeno agrícola en un clima cambiante), *Nature Sustainability* 1 (2018): 399-408, <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0106-0>.
- 205 Philipp Löw, Bernhard Osterburg y Susanne Klages, “Comparison of Regulatory Approaches for Determining Application Limits for Nitrogen Fertilizer Use in Germany” (Comparación de enfoques regulatorios para determinar los límites de aplicación para el uso de fertilizantes nitrogenados en Alemania), *Environmental Research Letters* 16, n.º 5 (2021): 055009, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf3de>; Sven G. Sommer y Leif Knudsen, “Impact of Danish Livestock and Manure Management Regulations on Nitrogen Pollution, Crop Production, and Economy” (Impacto de las regulaciones danesas de gestión del ganado y del estiércol en la contaminación por nitrógeno, la producción de cultivos y la economía), *Frontiers in Sustainability* 2 (mayo de 2021), <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.658231>.
- 206 Eric D. Roy et al., “Hot Spots of Opportunity for Improved Cropland Nitrogen Management Across the United States” (Puntos críticos de oportunidad para mejorar la gestión del nitrógeno en tierras de cultivo en todo Estados Unidos).
- 207 Universidad de Nueva York, “Applying Auto Industry’s Fuel-Efficiency Standards to Agriculture Could Net Billions” (Aplicar los estándares de eficiencia de combustible de la industria automotriz a la agricultura podría generar miles de millones de dólares); Matthew R. Sanderson y Vivian Hughes, “Race to the Bottom (of the Well): Groundwater in an Agricultural Production Treadmill” (Carrera hacia el fondo [del pozo]: agua subterránea en una cinta de correr de la producción agrícola), *Social Problems* 66, n.º 3 (2019): 392-410, <https://doi.org/10.1093/socpro/spy011>.
- 208 Matthew Houser, “Does Adopting a Nitrogen Best Management Practice Reduce Nitrogen Fertilizer Rates?” (¿La adopción de una mejor práctica de gestión del nitrógeno reduce las tasas de fertilizante nitrogenado?), *Agriculture and Human Values* 39 (2022): 79-94, <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10227-9>.
- 209 Bowles et al., “Addressing Agricultural Nitrogen Losses in a Changing Climate” (Abordar las pérdidas de nitrógeno agrícola en un clima cambiante).
- 210 Baojing Gu et al., “Cost-Effective Mitigation of Nitrogen Pollution from Global Croplands” (Mitigación rentable de la contaminación por nitrógeno de las tierras de cultivo a nivel global), *Nature* 613 (2023): 77-84, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05481-8>.