

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA**

**LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DEL AGUA POR LA ACTIVIDAD
AGROGANADERA**

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. JAVIER SAN ROMÁN SALDAÑA

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 20 DE SEPTIEMBRE DEL AÑO 2023*

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. JOSÉ LUIS SIMÓN GÓMEZ

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2023

Depósito legal: Z 1729-2023

Imprime:

Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza

Financiado por el Vicerrectorado de Política Científica de la Universidad de Zaragoza.

**LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DEL AGUA POR LA ACTIVIDAD
AGROGANADERA**

POR EL

Ilmo. Sr. D. JAVIER SAN ROMÁN SALDAÑA

Excelentísimo Sr. Presidente,

Ilustrísimos Sras. y Sres. Académicos y autoridades,

Señoras y Señores.

Excelentísimo Señor Presidente, Excelentísimos e Ilustrísimos señores académicos y autoridades, señoras y señores:

He sido propuesto por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza para tomar el relevo al doctor Mateo Gutiérrez Elorza, que fue profesor mío en la carrera de Geología, impartiendo las asignaturas de Geología General, en primero, y Geodinámica Externa y Geomorfología en tercero. Guardo muy buen recuerdo de la única asignatura claramente geológica que había en primer curso, y de la vistosa y amena Geomorfología de tercero, donde repasamos todos los modelados posibles del paisaje de nuestro planeta. Tengo que confesar que me atraían especialmente sus exámenes con diapositivas.

El profesor Gutiérrez Elorza fue durante 25 años director del Curso de Geología práctica de Teruel, todo un referente a nivel nacional. Catedrático desde 1982, dirigió 10 tesis doctorales. Destacó en cuatro facetas: por su contribución a la creación de la Sociedad Española de Geomorfología, por la proyección internacional que dio a la Geomorfología española, por los resultados en diferentes líneas de investigación geomorfológica (modelado semiárido de la cuenca del Ebro y de las depresiones turolenses, exokarst, procesos activos como la avenida catastrófica del torrente de Arás, impronta de los cambios climáticos en las formas del relieve...), y por la formación de un extenso grupo de geomorfólogos españoles. Ingresó en la Academia de Ciencias en el año 1996.

Mi discurso se va a centrar en otra rama de la Geología, la Hidrogeología, en la que me siento cómodo e implicado, pero sin duda, en mi formación, las demás han tenido también su peso. Podría destacar mi predilección por la Geología estructural, la Cartografía geológica, la Geomorfología o la Sedimentología. En mi vida profesional me ha servido también la Geoquímica o la Petrología, y en mi vida, en general, todas las demás, dándome visión de conjunto y claves para entender el mundo. A todos mis profesores les debo agradecimiento y creo que el comienzo de esta disertación es el lugar adecuado para manifestarlo.

Entre los temas sobre los que podría versar mi discurso de ingreso en la Academia, creo que la contaminación difusa del agua es de rabiosa actualidad y creciente preocupación. Se trata de una temática que integra, de alguna manera, varias facetas del conocimiento

científico, tiene mucho que ver con mis responsabilidades en la Confederación Hidrográfica del Ebro, y quiere ser una llamada de atención ante un problema medioambiental de dimensiones planetarias.

Índice

La fertilización tradicional de los campos	6
El guano y el nitrato de Chile	7
Los químicos alemanes	8
La disrupción del ciclo del nitrógeno	10
Transgrediendo los límites planetarios	11
Del suelo al acuífero	13
Primeros problemas en el agua subterránea	16
Situación actual de los acuíferos	19
Situación de las aguas superficiales: ríos, lagos y embalses	22
Problemas ambientales por exceso de nitratos en el agua: la eutrofización	27
Problemas para la salud. La potabilidad del agua	29
Legislación	31
Estrategias	34
Proyectos de investigación y tesis doctorales	35
Posibles acciones preventivas y correctoras	40
Reflexiones finales	43
Agradecimientos	45

La fertilización tradicional de los campos

Desde el nacimiento de la agricultura, en el Neolítico, hace unos 10.000-12.000 años, el ser humano ha utilizado desechos de animales, residuos vegetales, cenizas y arcillas como fertilizantes para abonar la tierra. Éstas prácticas le permitieron aumentar las cosechas, y gracias a ello pudo hacerse sedentario.

Cuando no había abono, y al objeto de compensar la pérdida de nutrientes en el suelo, el barbecho y la rotación de cultivos eran las estrategias que se seguían. Durante la Edad Media, en Francia y Flandes, existió un incipiente comercio de productos fertilizantes naturales, pero no sería hasta el siglo XIX cuando se empezaron a realizar experimentos químicos para descubrir qué afectaba al crecimiento de los vegetales.

La hambruna que provocó la erupción del volcán Tambora, en 1816 (el año sin verano), despertó la vocación del joven alemán Justus von Liebig (1803-1873). Estudió química y acabó demostrando, en 1840, que, contrariamente a las teorías de la época de que las plantas absorbían las sustancias resultantes de la descomposición de los cuerpos de los animales en el suelo, éstas necesitan ciertos elementos minerales para mejorar su crecimiento: nitrógeno, fósforo y potasio.

El guano y el nitrato de Chile

El guano (del quechua wánu, abono) es el sustrato resultante de la acumulación masiva de excrementos de murciélagos, aves marinas y focas, en ambientes áridos o de escasa humedad. Se trata de un abono blanco-amarillento muy efectivo, debido a su alto contenido en los tres componentes principales para el crecimiento de las plantas. Llega a alcanzar varios metros de espesor y se recolecta en islas e islotes del océano Pacífico, sobre todo en Perú (Figura 1a).



Figura 1: (a) Islote del Pacífico frente a las costas de Perú con acumulación de guano. (b) Cartel publicitario de Nitrato de Chile.

En 1802, durante su expedición por las Américas, Alexander von Humboldt tomó muestras, que envió a Alemania. Allí se estudiaron las propiedades del guano, que había sido utilizado por los incas y otros pueblos andinos durante cientos de años para fertilizar sus cosechas. Los escritos de Humboldt y las analíticas de Justus von Liebig llevaron a la introducción de este abono natural en Europa. En 1841, el buque “Bonanza” envió el primer cargamento a Inglaterra, y poco después fue necesario despachar 22 barcos más también a Francia y Alemania.

El comercio del guano llevó a la colonización de islas remotas. España se apropió de las islas Chincha, al sur de la ciudad de Lima, en 1864, donde había espesores de hasta 30 metros, provocando una guerra contra la alianza de Bolivia, Chile, Ecuador y Perú. El momento álgido de la disputa fue el bombardeo de la ciudad de Valparaíso, en 1865. Aún hoy, el guano es un producto muy apreciado por la agricultura ecológica.

El salitre es una mezcla de nitrato de potasio y nitrato de sodio. Se encuentra en grandes cuencas endorreicas de América del Sur: Atacama en Chile y Uyuni en Bolivia, donde alcanza espesores de hasta 3,6 metros. Suele aparecer asociado a formaciones de cloruro sódico, yeso y otras sales, y conforma un conjunto denominado localmente como “caliche”.

Cuenta la leyenda que dos indígenas hicieron una fogata y empezó a arder la tierra. Enterado el cura de Camiña (norte de Chile) y llevando agua bendita, terminó recogiendo unas muestras. Curiosamente, unas plantas del patio de su casa crecieron extraordinariamente junto a las muestras.

La explotación del salitre se hizo en diferentes etapas. Primero fueron Bolivia y Perú, entre 1830 y 1884. Luego, tras la “guerra del salitre”, también conocida como del Pacífico, Chile se hizo con esos territorios y hasta 1920 comercializó lo que denominó el Nitrato de Chile. Las empresas, creadas con capitales ingleses, y en menor proporción, alemanes y estadounidenses, realizaron una amplia campaña de publicidad por todo el mundo. Algunos de esos carteles (Figura 1b), realizados en cerámica, están siendo declarados en España como Bienes de Interés Cultural (BIC).

Las complejas relaciones laborales existentes en las explotaciones salitreras culminaron con una huelga nacional, en 1907, y una masacre de miles de personas. En esta zona surgieron grandes movimientos obreros. Las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura, en el desierto de Atacama, fueron declaradas Patrimonio de la Humanidad.

Los químicos alemanes

Mientras en América del sur se vivía un gran optimismo económico, en el resto del mundo se buscaban otras fuentes de nitrógeno para fabricar amoníaco (NH_3), la base de los fertilizantes y los explosivos. Las reservas de salitre se estimaba que durarían 30 años, lo que acabaría produciendo una crisis mundial y hambrunas. En 1898, el gran químico sir William Crookes desafió a la comunidad científica para evitar la inanición de la humanidad, señalando que la fijación del nitrógeno atmosférico (N_2) sería uno de los más grandes avances.

Alemania implantó un programa de investigación en muchas universidades, acuciada por la dependencia del salitre y por la necesidad de disponer de explosivos para la más que posible primera guerra mundial. En 1903, Fritz Haber (Figura 2a) experimentaba mezclando hidrógeno (H_2) y aire en presencia de potentes descargas eléctricas, con la intención de romper la molécula de N_2 y conseguir que se fijara con el hidrógeno. Sólo se consiguió un cierto éxito en Noruega, donde había grandes saltos hidroeléctricos.

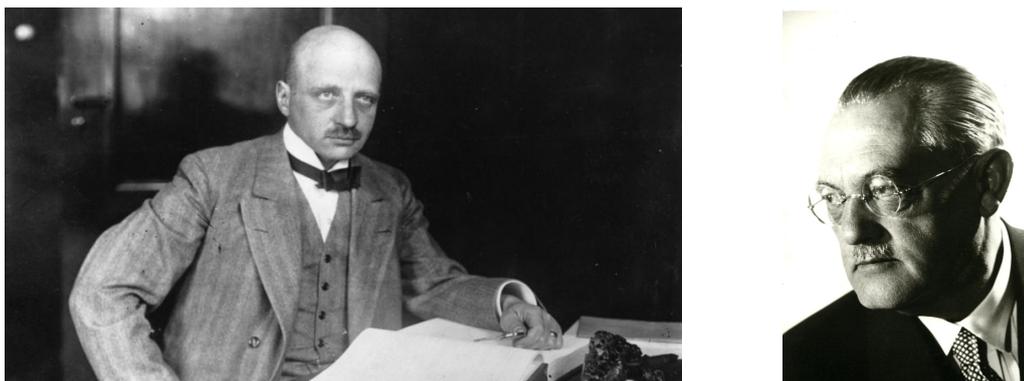


Figura 2: (a) Fritz Haber, Premio Nobel de Química en 1918. (b) Carl Bosch, Premio Nobel de Química en 1931.

La compañía BASF encargó a Carl Bosch (Figura 2b) que probara con altas presiones, y tras cinco años trabajando, apenas se consiguieron pequeñas cantidades y con un coste elevadísimo. Por su parte, Haber probó con altas presiones y alta temperatura, incluyendo después un catalizador: el osmio. En 1909 consiguió sintetizar casi un gramo de amoníaco. Bosch convenció a BASF de que la patente de Haber era el camino a seguir. Tras sustituir el catalizador e ir mejorando los reactores, se pudo construir una primera planta productora en 1913, la cual en su segundo año de funcionamiento ya generaba 20 toneladas de amoníaco al día. El proceso químico pasó a denominarse de Haber-Bosch. Haber recibió el premio Nobel de Química en 1918 y Bosch en 1931.

Este descubrimiento incrementó la autonomía técnica, científica e industrial de Alemania, y lamentablemente también abrió el camino a la terrible guerra mundial. Sin embargo, son innegables los beneficios que trajo a la humanidad, permitiendo el desarrollo agrícola y el cultivo de alimentos a una escala global por primera vez en la historia.

La población mundial se ha cuadruplicado desde entonces, en parte por la disponibilidad casi ilimitada de fertilizantes inorgánicos. Algunos autores consideran que, de no haberse conseguido la captura del nitrógeno atmosférico, habitaríamos este planeta sólo 4.000 millones de personas, es decir, la mitad (VALLADARES *et al.*, 2022).

Actualmente se producen más de 100 millones de toneladas de fertilizante de nitrógeno al año, consumiendo entre el 1 y el 2% de la energía mundial. Este proceso químico permite también sintetizar colorantes, textiles, plásticos, fibras sintéticas y explosivos. Evidentemente, supuso el cierre de todas las instalaciones salitreras chilenas y el derrumbe de la economía del país.

La disrupción del ciclo del nitrógeno

A finales del siglo XX, la humanidad ya fijaba más nitrógeno atmosférico, mediante el proceso de Haber-Bosch, que todos los ecosistemas del planeta juntos. Los fertilizantes inorgánicos estaban permitiendo una agricultura intensiva que producía mucha comida (la denominada Revolución Verde), pero también una contaminación creciente. La mitad de las tierras fértiles del planeta se hallan actualmente cultivadas (ATTENBOROUGH, 2021). El 50% del nitrógeno se desperdicia impactando en la salud humana, así como en la calidad del agua, en la del aire, en los gases de efecto invernadero, en los ecosistemas y en la biodiversidad.

Alrededor del 60% de las emisiones de óxido nitroso, un potente gas de efecto invernadero, provienen de campos fertilizados, de los abonos y de otras fuentes agrícolas.

El nitrógeno es imprescindible para los seres vivos. De todos los nutrientes minerales, es el que mayor efecto tiene en el crecimiento de los organismos fotosintéticos y, por lo tanto en la productividad primaria de los ecosistemas. El lixiviado y la escorrentía de fertilizantes, incluyendo el fósforo, el otro gran nutriente, provoca *blooms* o fenómenos de proliferación de algas en lagos, humedales y ríos, lo que se conoce como eutrofización.

El nitrógeno se encuentra en el agua y en los suelos en forma de nitratos y nitritos. Su ingesta, en concentraciones elevadas, puede provocar efectos sobre la salud humana: reaccionan con la hemoglobina de la sangre causando una disminución de su capacidad de transporte de oxígeno, pueden afectar al funcionamiento de la glándula tiroidea, disminuyen la vitamina A, y favorecen la producción de nitrosaminas, una de las causas más comunes de cáncer.

Lo que sin duda fue un logro científico y tecnológico, con el tiempo se convirtió en un grave problema: habíamos provocado la disrupción o rotura del ciclo del nitrógeno.

Al uso generalizado de los abonos inorgánicos, se está sumando, en las últimas décadas, la utilización cada vez más creciente de los estiércoles y purines derivados de la actividad ganadera como abono. El censo europeo arroja las siguientes cifras: 142 millones de cerdos, 76 millones de vacas y 60 millones de ovejas. España alberga el 25 % del ganado porcino y ovino (34 millones de cerdos y 15 de ovejas), y el 10 % del vacuno. Comparando el censo actual con el del 2009, se observa que en Europa está decreciendo, mientras que en España está aumentando: se está produciendo un traslado de las granjas desde los Países Bajos hacia el sur de Europa, especialmente a España. En la cuenca del Ebro se ha pasado de una cabaña de 8,5 millones de cerdos en el 2006 a casi el doble en la actualidad (14,2 millones). Algunas zonas como el canal de Urgell o el de Aragón y Cataluña están totalmente saturadas de granjas, con serios problemas para dar salida a los purines.

Transgrediendo los límites planetarios

Los límites planetarios son un marco conceptual que evalúa el estado de nueve procesos fundamentales para la estabilidad de nuestro planeta y sugiere unos umbrales que, en caso de ser superados, pueden poner en peligro la habitabilidad de la Tierra. La comunidad científica, aunque con mucho debate, acepta los siguientes:

- Cambio o crisis climática
- Acidificación de los océanos
- Agotamiento del ozono estratosférico
- Ciclo del nitrógeno y el fósforo
- Uso del agua dulce
- Deforestación y otros cambios de uso del suelo
- Pérdida de biodiversidad
- Contaminación de partículas de la atmósfera (aerosoles)
- Contaminación química: nuevos compuestos

Este concepto fue propuesto en 2009 por un grupo de 28 científicos internacionales liderados por Johan Rockström, del Stockholm Resilience Center (SRC), y Will Steffen, de la Australian National University (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009). Lo que pretendían era definir un “espacio de actuación seguro para el desarrollo humano” que pudiera ser utilizado por los gobiernos, organizaciones, sociedad civil, sector privado y comunidad científica. Revistas científicas como *Nature* o *Science* le han dedicado muchas páginas y es utilizado frecuentemente en la ONU (Figura 3).

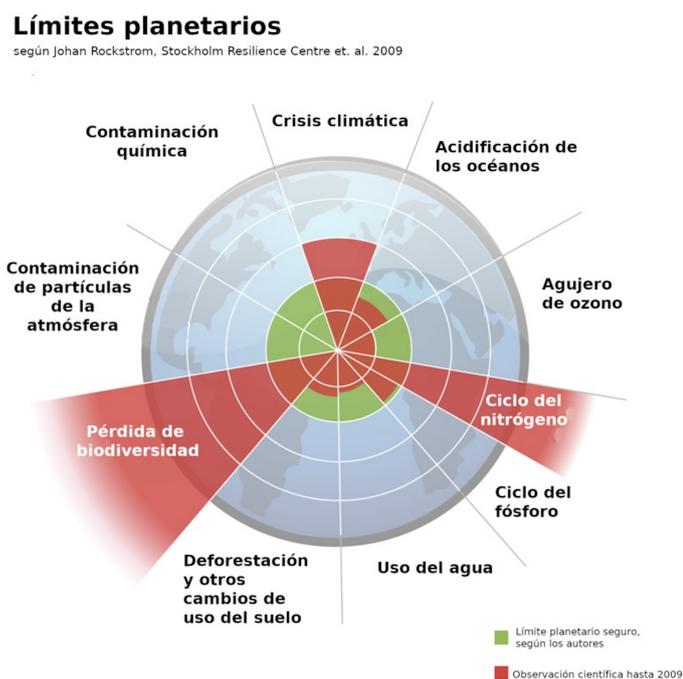


Figura 3: Diagrama de los límites planetarios (Ilustración tomada de F. Müller, Planet boundaries, www.zukunft-seibermachen.de).

Teniendo en cuenta el conocimiento disponible y la incertidumbre asociada a estos procesos, se han sugerido los niveles actuales de las variables de control del sistema, así como los umbrales de operatividad segura. Por ejemplo, para el cambio climático uno de los indicadores es la concentración de CO_2 en la atmósfera. El umbral fijado es 350 ppm (recordemos que recientemente se han superado ya los 420 ppm). Para el ciclo del nitrógeno se calcula el N_2 extraído de la atmósfera para uso humano, en millones de toneladas por año. El límite se ha establecido en 35 Mt/a y estamos ya en 121 Mt/a.

Ciertamente, hay subjetividad en todos estos conceptos y umbrales, y están siendo continuamente revisados. Por ejemplo, ya se habla de un límite para el nitrógeno de 43 Mt/a. Pero hay unanimidad en que los dos procesos que están más en riesgo son el ciclo del nitrógeno y la pérdida de biodiversidad, seguidos por el cambio climático. También es curioso comprobar cómo el ciclo del nitrógeno es el primer proceso que se disparó, ya en los años 60, con la Revolución Verde, cuando los demás estaban todavía dentro de límites seguros.

El cambio climático acapara hoy los medios y la actividad de organizaciones ecologistas. La desaparición de especies lleva décadas entristeciendo a la humanidad. Sin embargo, apenas recientemente se ha empezado a mostrar preocupación por la contaminación por nitratos de las aguas de humedales, ríos y lagos.

Del suelo al acuífero

La disponibilidad casi ilimitada de abonos inorgánicos, unido al desconocimiento bastante generalizado de los efectos que puede tener su mala aplicación, ha llevado a que los campos se sobreabonen con carácter general. Es común la práctica de aplicar un poco de abono de más, para que la planta no tenga limitado su crecimiento. Otras veces se abona antes de tiempo, con la idea de que allí quedará para cuando la planta lo pueda absorber. Si en esas circunstancias sobrevienen fuertes lluvias, o un riego excesivo, se produce el arrastre superficial o bien la infiltración en el terreno, si éste es suficientemente permeable.

A nivel mundial, los países con mayores excedentes de nitrógeno, por encima de 80 kg N/ha, son India y China. Estados Unidos presenta también amplias zonas por encima de ese umbral.

En el año 2000, la sobrefertilización media en la Unión Europea se estimaba en 55 kg N/ha (FERNÁNDEZ, 2007). Los países más agrarios superaban ampliamente esa cifra, si bien en la última década todos estaban mejorando: Países Bajos 226 kg N/ha en el año 2000 frente a 263 kg N/ha en 1990, Alemania 105 frente a 147 kg N/ha, Reino Unido 45-63 kg N/ha, Francia 39-55 kg N/ha o Italia 37-44 kg N/ha. De entre los más extensos, sólo España estaba empeorando 39 kg N/ha en el año 2000 frente a 27 en 1990.

La Unión Europea publicó un mapa, en el año 2007, con resolución de celdas de 10 km², en el que se ve con claridad las zonas con más excedente de nitrógeno (Figura 4). Por encima de 90 kg N/ha destacan amplias zonas de los Países Bajos, Bélgica, Dinamarca, la Bretaña francesa, el sur de Alemania, alguna zonas de Irlanda, la cuenca del Po en Italia; y en España, las zonas del valle del Ebro de Lérida y Huesca, así como el Ampurdán, en Gerona. Casi todo Alemania, la mitad de Francia, Irlanda, así como las mesetas españolas y los valles del Ebro y el Guadalquivir se situarían entre 30 y 60 kg N/ha. El resto de Europa, salvo alguna zonas montañosas o Escocia, entre 1 y 30 kg N/ha (GRIZZETTI *et al.*, 2007).

España elabora desde 1998 un balance anual del nitrógeno de su agricultura. Lo hace a instancias de la OCDE y siguiendo una metodología establecida en los Grupos de trabajo creados con tal fin. Esta tarea la realiza el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) y la publica en su página web. A lo largo de este periodo se han ido incorporando diferentes cambios metodológicos en el cálculo del balance, inducidos principalmente por un mejor conocimiento de la realidad agraria y física. Así, en los años 2015, 2017, 2018 y 2019 se rehízo toda la serie histórica.

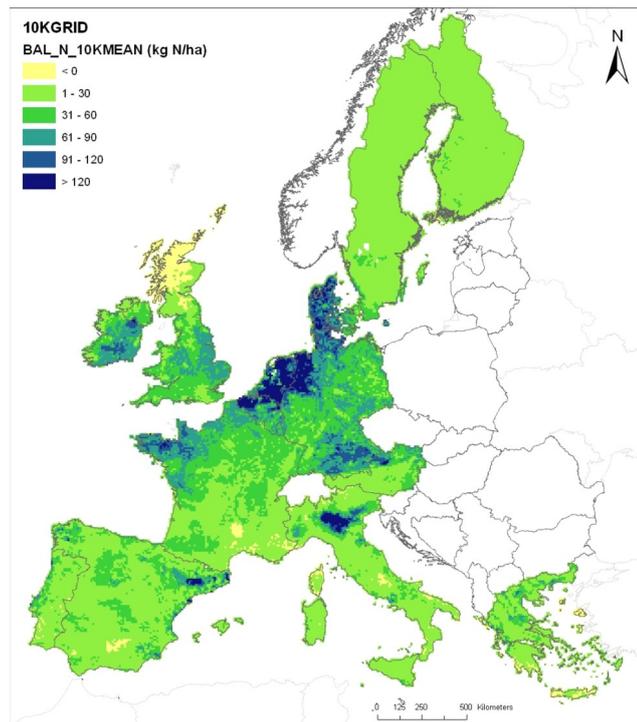


Figura 4: Excedentes de nitratos en Europa (GRIZZETTI *et al.*, 2007).

El balance se obtiene calculando la diferencia entre las entradas y salidas en las superficies de cultivos (herbáceos y leñosos) y en las zonas de pastoreo. Para estimar la fertilización mineral del balance, se parte de la superficie de cultivos y de las dosis de abonado mineral por cultivo, reducidas por las aportaciones de abonado orgánico y corregidas por los datos de ventas nacionales proporcionados por la ANFFE (Asociación nacional fabricantes de fertilizantes). Se consideran también las salidas debidas a volatilizaciones y desnitrificaciones que se producen en la gestión de estiércoles animales tras la fertilización y el abonado, así como la entrada de nitrógeno que se produce por la deposición atmosférica, junto con el aporte debido a semillas y a la fijación biológica.

En el periodo de cálculo se aplicaron a los campos españoles 2,48 Mt N, siendo vertidas al medio natural 0,93 Mt N, es decir, el 37% de lo aplicado. El excedente medio se sitúa en 23 kg N/ha. En la gráfica de evolución que aparece en el informe del último cuatrienio (Figura 5, MITECO, 2020), se aplica un ajuste lineal que indica un ligero descenso entre los años 2000 y 2018. Sin embargo, es evidente que pueden diferenciarse dos periodos, uno en suave descenso hasta el año 2008 para luego ir remontando hasta el 2018.

El Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia ha desarrollado el modelo PATRICAL, utilizando una escala municipal (PÉREZ-MARTÍN, 2005). Aplicado a toda España, para el periodo 2014-2017 (PÉREZ-MARTÍN,

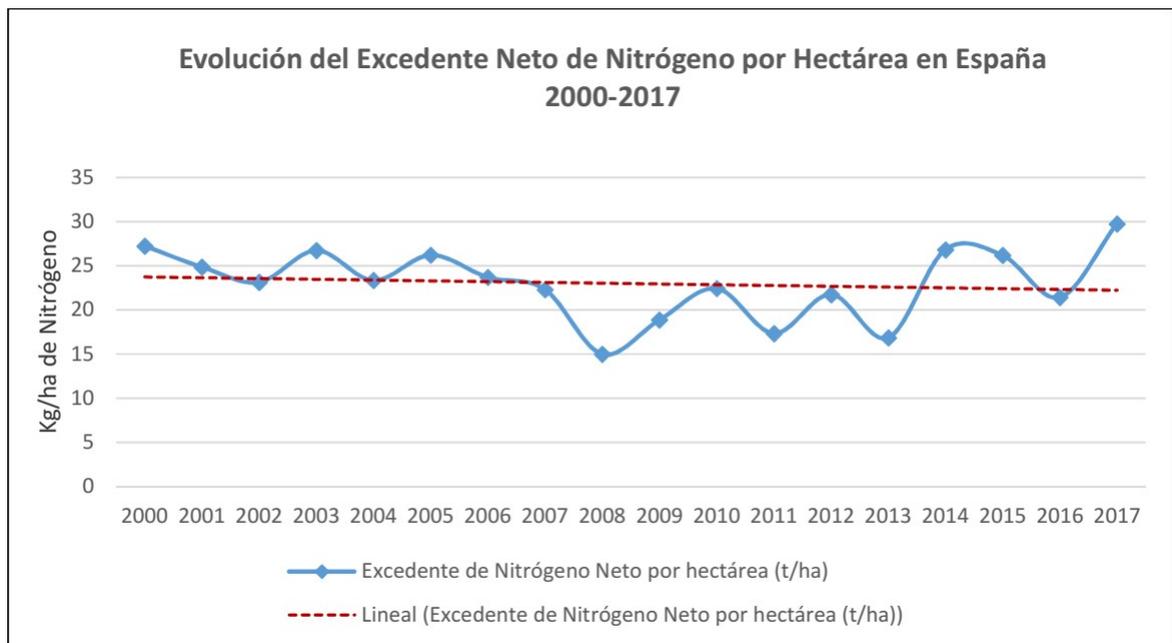


Figura 5: Evolución de los excedentes de nitratos en España. Datos del MAPA (MITECO, 2020).

2021), se obtiene un interesante mapa (Figura 6) donde destacan las zonas con balance superior a 100 kg N/ha: planas litorales de la Comunidad Valenciana, Campo de Cartagena, Campo de Dalías, zona baja del Guadalquivir y valle del Ebro: Lérida, Huesca y sur de Navarra.

Los datos presentados son resultado de balances de nitrógeno, pero cada vez existen más estudios directos sobre el contenido de nitrógeno que se infiltra hacia la zona no saturada, desde el suelo hasta los acuíferos. En España destaca, ya en 1994, el trabajo de Sánchez Pérez y otros de la Universidad del País Vasco (SÁNCHEZ *et al.*, 1994), que monitorizaron dos parcelas experimentales sobre el acuífero aluvial de Vitoria. Utilizaron, conjuntamente, técnicas de muestreo de soluciones mediante tomamuestras de succión y medidas de humedad por reflectometría temporal (TDR). El flujo anual que obtuvieron fue de 43 kg N/ha. Este trabajo pionero se presentó en la Jornadas de Investigación de la Zona No Saturada, en el año 1994. Desde entonces se celebran periódicamente cada dos años, estando convocadas ya las XVI Jornadas, que organizará el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC).

Por último, y aunque sea de forma indirecta, son muy interesantes las imágenes que captan algunos satélites con capacidad para detectar las emisiones de amoníaco a la atmósfera. El amoníaco procede del abonado directo con purines o bien de las balsas de almacenamiento

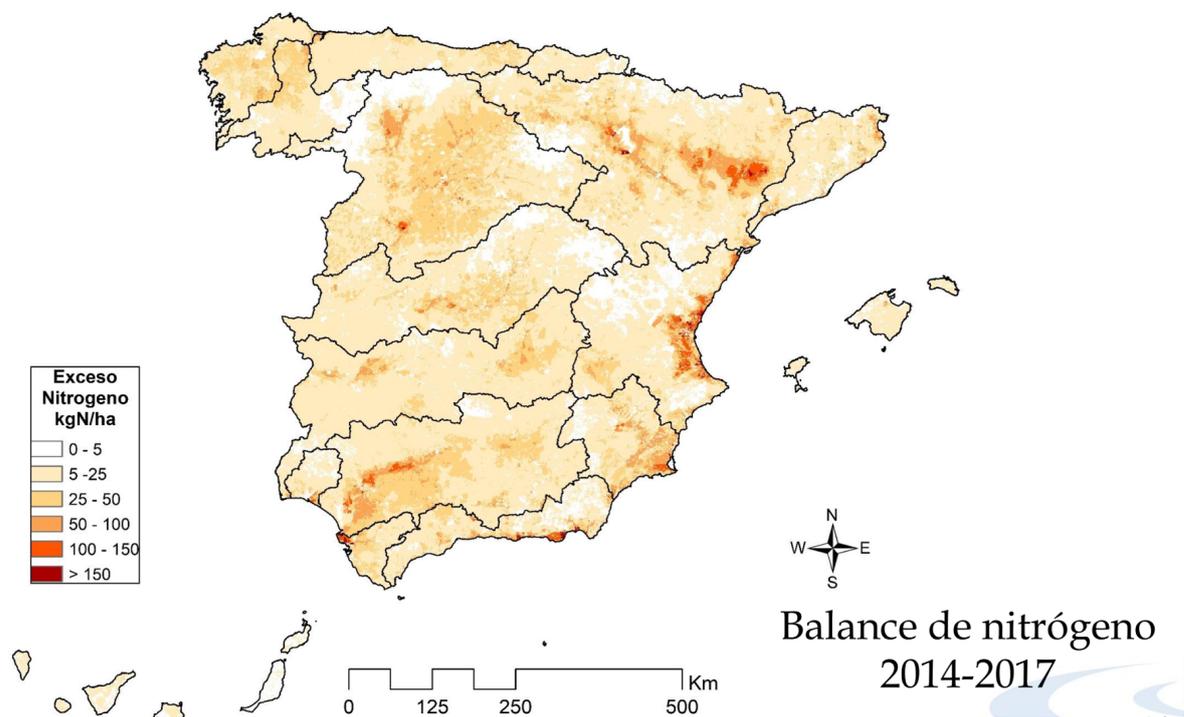


Figura 6: Excedentes de nitratos en España según el modelo PATRICAL (PÉREZ-MARTÍN, 2005).

de purines de las granjas. El satélite Landsat dispone de ese sensor, y las imágenes que ofrece hablan por sí solas, enfatizando aquellas zonas con gran concentración de granjas (Figura 7).

Primeros problemas en el agua subterránea

El exceso de nitrógeno, en forma de nitrato, percola desde el suelo y, allá donde hay acuíferos libres, se incorpora al lento flujo subterráneo. Si el estudio de la zona no saturada es complicado y relativamente reciente, determinar la contaminación por nitratos en el agua subterránea de los acuíferos es una actividad clásica de la Hidrogeología. En este sentido, es importante destacar la labor de investigación que ha realizado el colectivo hidrogeológico español, desde hace bastantes décadas, alertando sobre la problemática que se estaba empezando a detectar.

Por su interés destacamos tres jornadas que, organizadas por el Grupo español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), se realizaron en los años 1981, 1994 y 1998.

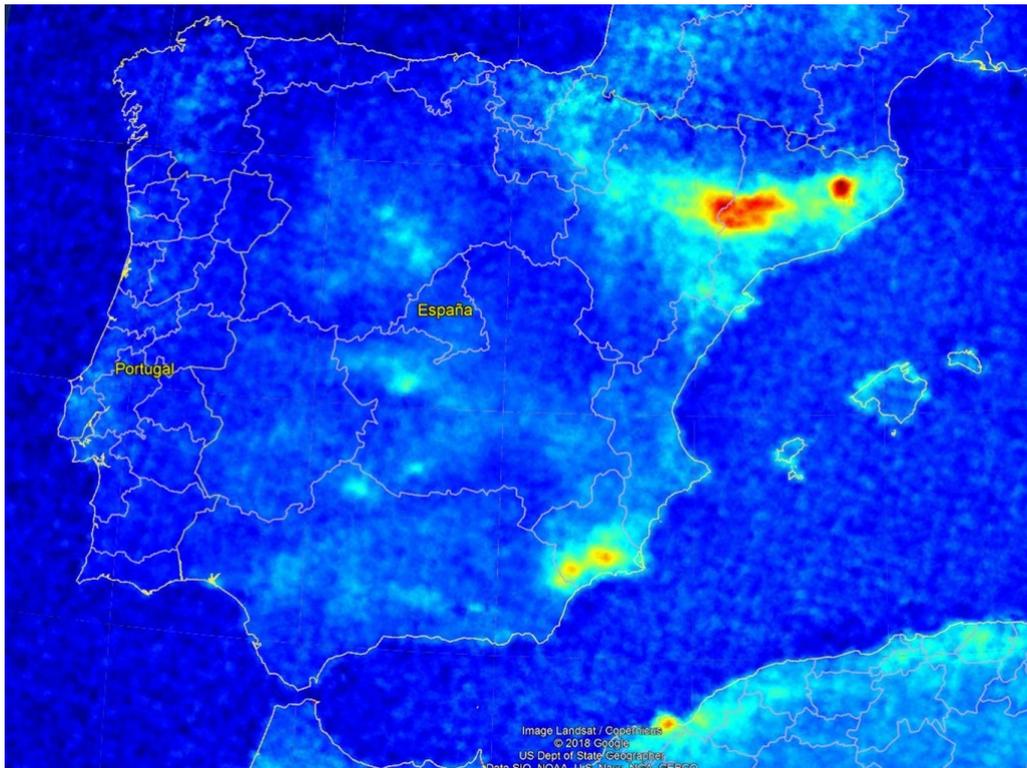


Figura 7: Imagen del satélite Landsat/Copernicus (2018), que muestra las zonas con altas emisiones de amoníaco a la atmósfera.

1981: “*Jornadas sobre análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas en España*”. Barcelona. Se editaron dos tomos de ponencias (1055 páginas). Las jornadas se organizaron en torno a ocho sesiones, siendo la primera la dedicada a la “Contaminación de aguas subterráneas por actividades agrícolas”. Otras sesiones se dedicaron a los “Métodos de estudio para la detección y control de la contaminación de aguas subterráneas”, “Métodos de protección de la calidad” o “Régimen jurídico-administrativo”. En total hubo más de 30 ponencias, otras tantas notas técnicas, además de ocho mesas redondas.

Repasando las ponencias se observa que la contaminación por nitratos del agua subterránea era un problema que se estaba detectando, desde hacía una década, en el Reino Unido o Países Bajos. El profesor Ramón Llamas (LLAMAS, 1981) contaba cómo las autoridades medioambientales de Estados Unidos se habían dado cuenta de que lo importante era prevenir esta contaminación difusa y proteger los abastecimientos. Emilio Sanchís (SANCHÍS, 1981) ponía el foco en la mala administración de los fertilizantes por parte de los agricultores.

Otros autores ponían ejemplos de esta preocupante realidad, detectada también en España. Amable Sánchez y Manuel Varela comparaban las concentraciones de nitratos en la Plana de Castellón, observando un incremento en las concentraciones medias de 140 hasta 160 mg/l entre los años 1976 y 1980 (SÁNCHEZ y VARELA, 1981). Javier Castiella estudiaba el aluvial del Ebro en Navarra, aportando gráficas y mapas de concentraciones, y alertando del problema ya existente. En la zona de Mendavia se registraban concentraciones medias por encima de 100 mg/l, mientras que en Cortes de Navarra las concentraciones estaban sobre los 30 mg/l (CASTIELLA *et al.*, 1981). Otras zonas estudiadas se situaban en la Comunidad Valenciana (Sagunto, Gandía, Denia), Albacete, Madrid o la zona del Canal de Urgell.

1994: “*Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas*”. Alcalá de Henares. Se editaron dos tomos de ponencias, con 981 páginas. Hubo siete secciones, destacando la tercera “Experiencias de contaminación difusa de las aguas subterráneas” y la sexta “Implicaciones ambientales de la contaminación de las Aguas Subterráneas: impacto sobre el hombre y los ecosistemas”. En total se presentaron 7 ponencias y 58 comunicaciones. Andrés Sahuquillo, en su ponencia “Protección, detección y control de la contaminación de acuíferos”, indicaba que “algunos acuíferos están aumentando de forma alarmante su contenido en nitratos” (SAHUQUILLO, 1994).

1998: “*La contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*”. Valencia. 622 páginas. Organizada en torno a cinco temas, contó con 12 conferencias, 40 comunicaciones y 2 mesas redondas. La charla inaugural de Stephen Foster requiere un análisis detallado. El presidente de la AIH indicaba: “La contaminación difusa derivada de la agricultura es probablemente la amenaza más seria de las aguas subterráneas en Europa, en términos de volumen de recurso y de número de captaciones afectadas”. “Las principales zonas de recarga de acuíferos (...) son zonas agrícolas que han experimentado una notable intensificación” (FOSTER, 1998).

Desde los años 70 ya se conoce este problema. Algunas de las soluciones que se están implementando son los cambios de cultivos, reducir la intensidad de producción, creación de orlas de seguridad alrededor de las captaciones de abastecimiento mediante compra de tierras, pozos alternativos, pozos para mezclas de aguas, plantas de tratamiento de nitratos. Todo esto lo está pagando el consumidor (el contribuyente) en vez de la comunidad agrícola, que es la causante del problema. Foster también advertía de que “herbicidas e insecticidas han penetrado en los acuíferos más vulnerables”, y destacaba la paradoja de que se estaba incrementando el consumo de agua mineral embotellada.

En la ponencia “La contaminación de las aguas subterráneas por las actividades agrarias en España” se presentaban dos puntos de vista. El investigador del IGME José Antonio López Geta, en representación de la Administración, señalaba que el 30 % de la población de España se abastece de agua subterránea y que diversas instituciones están alertando del problema derivado de la contaminación difusa (LÓPEZ GETA, 1998). Entendía que la falta de legislación y medios estaba provocando un agravamiento de la situación. También destacaba que la Directiva de Nitratos, de 1991, se había transpuesto en España con tres años de retraso, lo que da una idea de lo poco que interesaba este asunto a nuestras autoridades. Por último, concluía que lo importante era proteger.

El punto de vista de la investigación lo defendió Lucila Candela (CANDELA, 1998). Indicaba que entre los años 60 y los 90, en España se había producido un incremento de la aplicación de nitrógeno, pasando de una media por hectárea de 10 a 33 kg. Había zonas de cítricos donde se estaban alcanzando cifras de hasta 5000 kg N/ha. Resaltaba que “actualmente, la relación entre agricultura y calidad de las aguas subterráneas constituye un motivo de preocupación a nivel científico y político”.

Entre las publicaciones que se presentaron destacaba una sobre la Comunidad Valenciana, donde se presentaban datos de lixiviados de nitrógeno, en campos, que oscilaban entre los 30-70 kg N/ha en secanos y los 240-390 kg N/ha en huertas intensivas.

Centrándonos en **Aragón**, hay que remontarse al año 1989 para encontrar los primeros trabajos sobre la problemática de los nitratos en el agua subterránea. El equipo de la cátedra de Hidrogeología de la Universidad de Zaragoza presentó en el SMAGUA dos comunicaciones: “Distribución y evolución del contenido en nitratos en el acuífero aluvial del bajo Gállego: primeros resultados” (SÁNCHEZ *et al.*, 1989) y “La contaminación por nitratos del sistema acuífero de Alfamén: primeros resultados” (DE MIGUEL, 1989). En el primero de los trabajos se comparaban datos correspondientes a los años 1976, 1983 y 1988, constatándose un incremento generalizado, desde concentraciones medias de nitratos de 10-20 hasta 50-60 mg/l. En el segundo se ponía de manifiesto que el 37 % de las muestras tomadas superaban los 50 mg/l de nitratos, es decir, el límite de la potabilidad.

Situación actual de los acuíferos

Es difícil hacer diagnósticos sobre la contaminación por nitratos en el agua subterránea. La realidad hidrogeológica es compleja: existen zonas impermeables, diferentes tipos de acuíferos, diferentes espesores, geometrías, y además las concentraciones varían tridimen-

sionalmente según estemos en zonas de recarga o descarga, y a diferentes profundidades. Los estudios globales, a nivel mundial, prefieren hablar de excedentes de nitrógeno, ya que son datos georreferenciables. No obstante, el PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) estima que el 50 % de las masas de agua subterránea no presentan buena calidad química.

Si aumentamos un poco la escala, podemos centrarnos en nuestro continente. La Comisión Europea realiza cada cuatro años un informe sobre la aplicación de la Directiva 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. El último informe hace referencia al periodo 2016-2019 y se publicó en octubre de 2021 (COMISIÓN EUROPEA, 2021).

El 14,1 % de las estaciones de agua subterránea de la UE superan una media anual de 50 mg/l. En el mapa que se presenta en el informe, aparecen diferentes regiones europeas con concentraciones medias por encima de 50 mg/l, destacando Países Bajos, Alemania y, dentro de España, Cataluña y Murcia. Este mapa no deja de ser una aproximación al problema, ya que se trata de concentraciones medias. Si existen acuíferos con concentraciones muy altas, por encima de 100 mg/l por ejemplo, pero la región es muy extensa, su concentración media puede resultar baja.

Se impone seguir incrementando la escala y centrarnos en España. La Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) elaboró un informe en diciembre de 2020, con datos del periodo ya comentado: 2016-2019. Se trabajó con datos de la red de control de nitratos, compuesta por 4700 puntos de muestreo. De éstos, el 31 % superan los 50 mg/l y el 6,5 % se sitúan entre 40 y 50 mg/l. Las zonas más afectadas se sitúan en Cataluña, Mallorca, Menorca, Las Palmas de Gran Canaria, eje del Ebro, Plana de Valencia y Campo de Cartagena (MITECO, 2020).

Comparando el periodo 2016-2019 con los anteriores 2012-2015 y 2008-2011, se observa cierta estabilidad, siendo similar el número de puntos que aumentan su concentración con el que disminuye. Sin embargo, si nos fijamos en la cartografía, se ve claramente que las zonas que están empeorando se sitúan en Cataluña y el valle del Ebro, con incrementos de 5 mg/l por cuatrienio.

Siguiendo con nuestro “zoom hidrogeológico”, lo lógico es centrarnos a nivel de cuenca hidrográfica, en este caso la del Ebro. La Confederación Hidrográfica del Ebro publicó en marzo de 2021, el “Informe sobre la determinación de aguas afectadas o en riesgo de contaminación por nitratos de origen agrario en la demarcación del Ebro (periodo 2016-2019)”. El informe CHE (2021) parte de más de 2000 analíticas anuales de nitratos,

obtenidas en una horquilla de puntos de muestreo que va de 750 hasta 1300, según años. De éstos, 427 son puntos operados por cuatro Comunidades autónomas: Cataluña, País Vasco, Navarra y La Rioja. Los resultados analíticos de esta red, se pueden consultar y descargar a través de una aplicación web alojada en su página de internet.

El informe concluye que, de las 105 masas de agua subterránea existentes, 61 (58 %) están afectadas o en riesgo de estarlo (Figura 8). Las que presentan una mayor superficie afectada son: Calizas de Tárrega (100 %), Aluvial del Miranda de Ebro (87 %), Aluvial de Urgell (78 %), Sierra de Montsiá (67 %), Aluvial del Ebro: Tudela-Alagón (58 %), Aluvial del Najerilla-Ebro (57 %), Aluvial de Vitoria (48 %), Aluvial del Oja (46 %) y Aluvial del Ebro: Lodosa-Tudela (42 %).

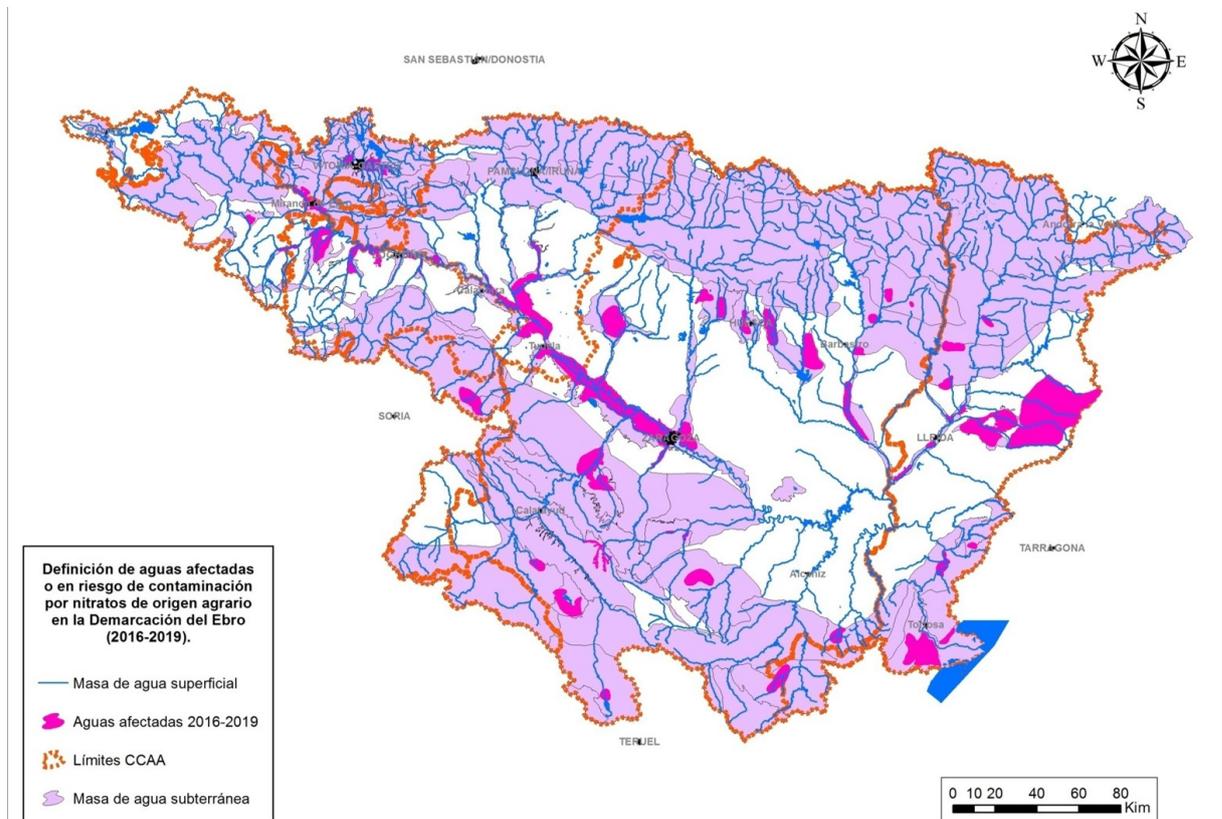


Figura 8: Aguas subterráneas afectadas por nitratos en la cuenca del Ebro. Periodo 2016-2019 (CHE, 2021).

Otra forma de entender la dimensión de la contaminación es ver las concentraciones medias y las máximas. Así, el Aluvial del Zidacos, en Navarra, ostenta el récord en cuanto a concentración máxima puntual de nitratos: 750 mg/l, con valores medios en torno a 50 mg/l. Otra masa muy afectada son los Puertos de Beceite, en concreto el entorno de la localidad de Peñarroya de Tastavins, donde se han alcanzado concentraciones de 650 mg/l en la fuente Figueta (el récord se alcanzó en mayo del año 2015, con un valor de

879 mg/l). En esta zona existe un gran desarrollo de la ganadería intensiva de porcino. Sin embargo, no hay suficiente tierra de cultivo disponible para la gestión del enorme volumen de purines que se generan, por lo que éstos se están aplicando al terreno en grandes cantidades y de manera inadecuada (SAN ROMÁN *et al.*, 2015).

Entre las diferentes masas afectadas destacamos, en Cataluña, las Calizas de Tárrega, con máximos de 533 mg/l, Aluvial de Urgell: 385 mg/l y Plana de la Galera: 374 mg/l. En la cabecera de la cuenca, el Aluvial de Miranda de Ebro presenta máximos de 208 mg/l y medias en torno a 80 mg/l; el Aluvial del Tirón, 162 y 120 mg/l; el Aluvial del Oja, 132 y 100 mg/l, y Aluvial del Najerilla-Ebro, 297 y 90 mg/l. En el tramo medio del aluvial del Ebro encontramos valores máximos de 210 mg/l en Rioja-Mendavia, 228 mg/l en Lodosa-Tudela, y 213 en Tudela-Alagón, con medias en torno a los 50 mg/l.

En la Cordillera Ibérica los problemas son importantes en el Plio-Cuaternario de Alfamén, con máximos de nitratos de 180 mg/l y medias sobre los 130 mg/l, y en Gallocanta, con 209 y 80 mg/l respectivamente. En el Pirineo y sus piedemontes destacamos los Sasos del Alcanadre, 238 y 80 mg/l, Sasos de Bolea-Ayerbe, 163 y 100 mg/l, Hoya de Huesca, 131 y 70 mg/l, Litera Alta, con máximos de 225 mg/l, Sinclinal de Graus, 166 mg/l, y Sinclinal de Treviño, 125 mg/l.

Comparando con los cuatrienios anteriores, se observa que se ha pasado de 26 masas de agua afectadas en el 2004-2007, a 36 entre 2008 y 2015, y 61 en la actualidad. Las zonas en las que más aumento se detecta son en aquellas con fuerte presión ganadera. Se presentan tres gráficas donde se observa la evolución ascendente de la concentración de nitratos en diferentes puntos y acuíferos de la cuenca del Ebro: en un acuífero calcáreo del Prepirineo oscense (Figura 9a), en el aluvial de la Hoya de Huesca (Figura 9b), y en el acuífero detrítico Plio-Cuaternario de Alfamén, en la provincia de Zaragoza (Figura 9c).

Situación de las aguas superficiales: ríos, lagos y embalses

Los ríos y lagos recogen los excedentes de nitrógeno aplicados en los campos. La contaminación llega hasta ellos por dos caminos: superficial y subterráneo. El superficial es el más evidente. Si acontecen lluvias importantes, o bien riegos excesivos, la escorrentía arrastra consigo el nitrógeno, en forma de nitrato disuelto. Para controlar estos pulsos es fundamental realizar muestreos de alta frecuencia. Entre los años 2011 y 2014, el proyecto Life CREAMAGUA estudió, entre otros asuntos, este efecto en el río Flumen, en Huesca (DARWICHE-CRIADO y COMÍN, 2014).

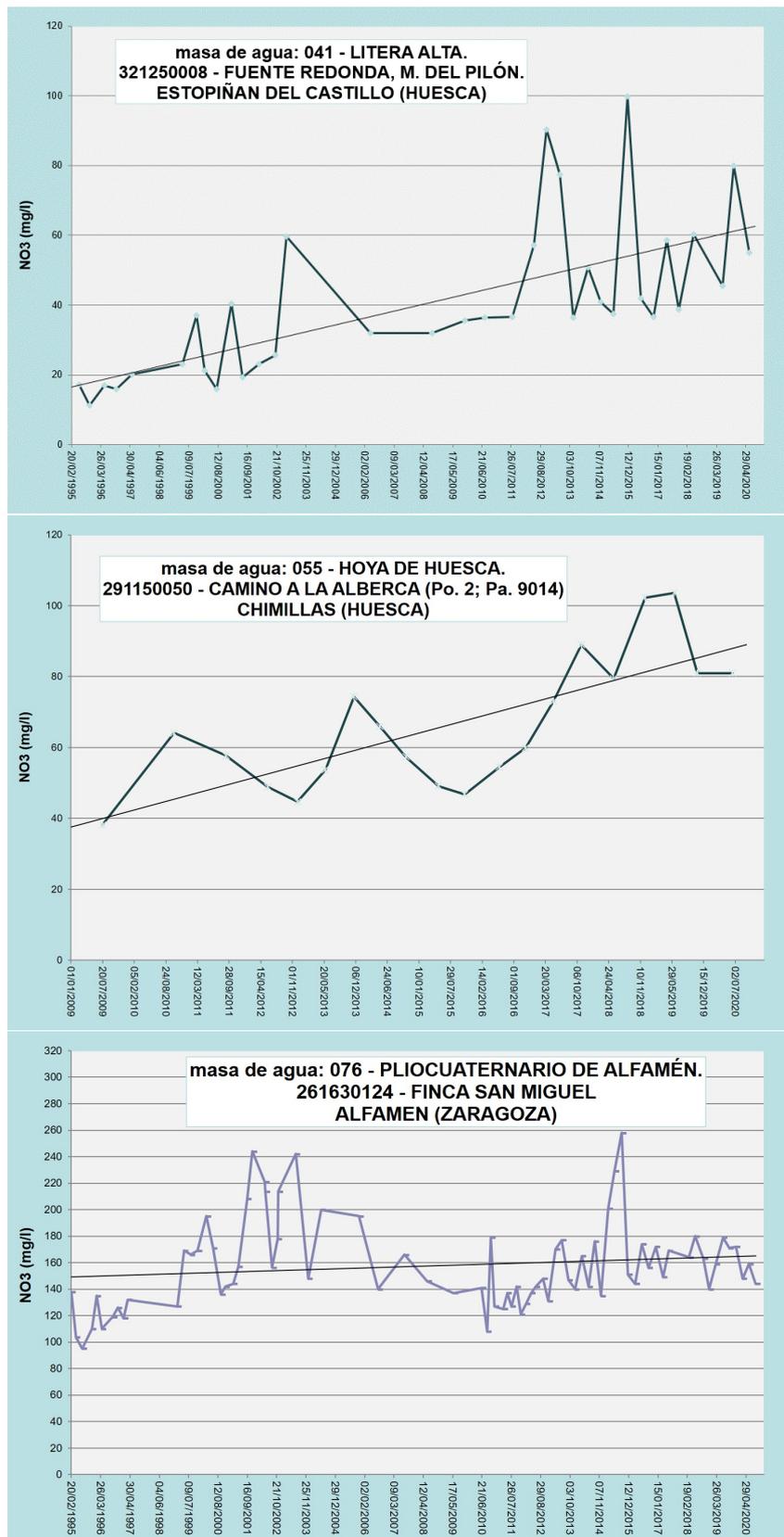


Figura 9: Evolución de la concentración de nitratos en tres áreas de la cuenca del Ebro. (a) Sinclinal de Estopiñán (Huesca). (b) Acuífero aluvial de la Hoya de Huesca. Chimillas. (c) Acuífero Plio-Cuaternario de Alfamén (Zaragoza).

Por la implicación ambiental que supusieron, son de destacar dos crecidas del río Matarraña, que movilizaron grandes cantidades de purines aplicados como abono en los campos:

- El día 1 de julio de 2014 unas lluvias importantes, en torno a 100 mm, arrastraron los purines desde los campos hasta el río, quedando depositados en los diversos azudes, y entrando en el embalse de Ribarroja. Los agricultores de la zona exigieron a la Confederación Hidrográfica del Ebro la limpieza del cauce y de sus azudes. El 18 de agosto el brazo del embalse donde desemboca el Matarraña se tiñó de color verde fosforescente por un *bloom* de cianobacterias. Hubo que cortar diversos abastecimientos.
- El 12-13 de noviembre de 2022, otro episodio de fuertes lluvias (gota fría) provocó un arrastre similar, entrando 30 hm³ en el embalse. El 17 de noviembre, en la toma del Consorcio de Aguas de Tarragona en el río Ebro, debajo de Tortosa, se registró un incremento de materia orgánica totalmente anómalo. Estudiando los registros de las dos estaciones de calidad automáticas (SAICA) del Ebro en Ascó y Xerta, se pudo ver el paso previo por ellas, y por lo tanto relacionarlo con la entrada desde el Matarraña.

También resultan muy esclarecedores y disuasorios los analizadores en continuo de nitratos en ríos. En la cuenca del Ebro, su sistema SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas) dispone de varios. El situado en el tramo final del Alcanadre (Ballobar, Huesca), que recoge los retornos del sistema de Riegos del Alto Aragón, registra ya valores superiores a 50 mg/l en algunas épocas del año. Está previsto instalar dos nuevos analizadores en la Clamor Amarga (Canal de Aragón y Cataluña) y el Arba (sistema de Bardenas).

Estos ejemplos son claros; sin embargo, el camino subterráneo de llegada de la contaminación a los ríos, lagos y humedales es el más importante. Los acuíferos descargan lenta pero constantemente, bien sea a través de manantiales puntuales o, más frecuentemente, mediante un aporte difuso. Los caudales de base de los ríos siempre corresponden con aportes subterráneos, y muchos humedales y lagos no se secan, o se secan mucho más despacio de lo que marca la evaporación, por el aporte de los acuíferos. Si esos acuíferos ya no se encuentran el buen estado, por recibir exceso de nitratos, el problema acaba trasladándose a las masas de agua superficial.

A nivel mundial es el PNUMA quien suministra datos globales sobre la situación de las aguas superficiales. Es difícil, no obstante, analizar e interpretar los datos, ya que los ríos están bastante modificados por la acción del hombre: hay algunos que ya apenas aportan agua en sus desembocaduras, como el Colorado o los Sir-Daria y Amu-Daria en el mar de Aral, y otros están muy modificados por la construcción de embalses, como el Nilo, el Yangtsé o el Misisipi. En cuanto a los lagos, asistimos a la reducción o desaparición de unos cuantos, como el ya mencionado del Mar de Aral, el lago Chad, Mar Muerto, Gran Lago salado de Utah, Tai (este de China), o Poopó (Bolivia). Los Grandes Lagos de Norteamérica, que contiene el 20 % del agua dulce superficial del planeta, presentan problemas de eutrofización, lo mismo que los lagos africanos, entre los que llama la atención el lago Tanganica.

Comparando datos de nitratos en las desembocaduras de los principales ríos entre 1990-1999 y 2000-2007, el PNUMA observa un incremento en Rusia, China, India, río Grande (EEUU) y el Po, en Italia. No obstante, el informe más interesante es el elaborado en 2021 que lleva por título: “Progresos en la calidad de las aguas ambientales. Novedades sobre el indicador mundial 6.3.2 y necesidades de aceleración”, que se enmarca dentro de los trabajos de evaluación de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), en concreto del ODS nº 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos (PNUMA, 2021). En el informe han colaborado 96 países, entre los que no se encuentran España, China, India o Turquía.

Las principales amenazas a la calidad de las aguas ambientales, a nivel mundial, son la agricultura (el 38 % de la superficie terrestre está cultivada), las aguas residuales, la minería y el cambio climático. Según el informe, el 60 % de las masas de agua (45.966) son de buena calidad. Si nos referimos a los ríos, la cifra es del 40 %, y para los lagos del 50 %.

A nivel europeo, el informe de la Comisión del año 2021 indica que son aguas eutróficas el 36 % de los ríos, el 32 % de los lagos, el 31 % de las aguas costeras, el 32 % de las aguas de transición y el 81 % de las aguas marinas. Destaca especialmente el Mar Báltico, en el que la eutrofización afecta al 97 %.

En España, el MITERD ha recopilado datos de 3885 masas de aguas superficiales y de 473 de transición y costeras, durante el cuatrienio 2016-2019. Se ha trabajado con datos de 3200 puntos de muestreo en ríos, 640 en lagos y embalses, y 500 en aguas de transición y costeras. El porcentaje de masas tipo lago o embalse con problemas de eutrofia es del 23 %, mientras que para las aguas de transición y costeras es del 29 %. La tendencia con

respecto a cuatrienios anteriores es de ligero descenso. El Mar Menor es, sin duda, uno de los puntos negros del panorama nacional, seguido por la Albufera de Valencia (MITECO, 2020).

A nivel de la cuenca del Ebro se trabaja sobre 451 puntos de control, lo que implica más de 1800 analíticas anuales (CHE, 2021). El diagnóstico para ríos indica que 35 masas están afectadas por nitratos. Esta cifra se ha incrementado con respecto a cuatrienios anteriores, cuando era de 12 (2008-2011 y 2012-2015) y 1 (2004-2007). Los ríos más afectados son el Corb y el Sió en Lérida, la Clamor Amarga (Figura 10), Valcuerna, Alcanadre y Flumen en Huesca, Arba en Zaragoza, Zidacos en Navarra, Alegría en Vitoria, Oroncillo en Burgos, Zamaca en La Rioja y Tastavíns en Teruel.

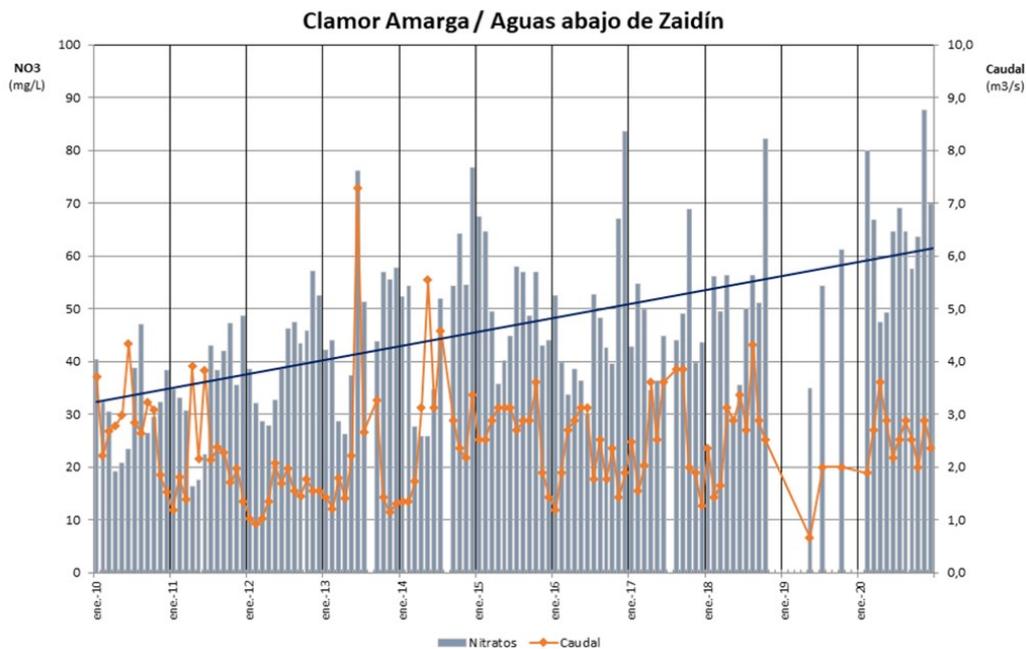


Figura 10: Evolución de la concentración de nitratos. Clamor Amarga (Huesca).

En lagos y embalses la forma de determinar su estado es mucho más compleja, utilizándose la clasificación de la OCDE, que implica determinar a lo largo del año y en varios lugares de la masa el fósforo total, el Disco de Secchi, la clorofila a y la densidad algal o índice de Margalef. De las 57 masas existentes de tipo lago, 35 (61 %) están en buen estado, 11 (19,3 %) se diagnostican como en estado moderado, 10 (17,5 %) como deficiente, y una (1,8 %) como malo. Destacan como las más impactadas las de Sariñena, Estanca, Chiprana, Gallocanta y los galachos de Juslibol y La Alfranca. Entre los 82 embalses, 40 (48,8 %) presentan estado “peor que bueno”. El más eutrofizado es, sin lugar a duda, el

embalse de El Val (Zaragoza). Otros con problemas se sitúan en el río Ebro (Ribarroja, Flix, Ebro, Sobrón) o en sus afluentes: Sotonera, Utxesa y Urrúnaga en la margen izquierda y Tranquera en la derecha.

Problemas ambientales por exceso de nitratos en el agua: la eutrofización

Son diversos los efectos ambientales que los nitratos provocan. Junto con el exceso de fósforo, inducen lo que se conoce como eutrofización, es decir, una proliferación de algas y bacterias, que dan un aspecto verdoso al agua, y que pueden acabar consumiendo el oxígeno que necesitan la mayoría de las especies. Quizá el ejemplo más cercano y vergonzoso sea el Mar Menor, que es calificado popularmente como una “sopa verde”.

Los problemas ligados a la eutrofización de las aguas podemos agruparlos en tres:

Proliferación de vegetación. Un primer efecto es la proliferación de vegetación, tanto dentro del cauce como en las márgenes: al fin y al cabo, el agua discurre “abonada”. En la cuenca del Ebro se ha ido incrementando la presencia de macrófitos en las últimas décadas. Empezó en el tramo final del Ebro, donde la toma de la central nuclear de Ascó ha tenido problemas desde el año 2000, obligando a continuas “siegas” preventivas aguas arriba. Luego se ha ido extendiendo por los afluentes: Segre, Cinca, Alcanadre, etc. (Figura 11).



Figura 11: Proliferación de macrófitos en el río Segre a su paso por Lleida.

Las plantas acuáticas obstruyen tomas de agua y son el hábitat ideal para que la molesta mosca negra ponga sus huevos, con los problemas sanitarios que sus mordeduras implican en la población. Muchos centros de salud ribereños se colapsan en verano al tener que atender diariamente a cientos de personas con inflamaciones e irritaciones. Las administraciones han optado por hacer costosos tratamientos, a veces desde helicóptero, con un potente biocida, el Bti (*Bacillus thuringiensis israelensis* serotipo H-12 22). Son necesarios entre 6 y 9 tratamientos al año.

En las márgenes crece desmesuradamente el bosque de ribera, muchas veces con especies propias de cultivos agrícolas, lo que unido a la reducción de crecidas que hemos provocado con los embalses, dibuja unos cauces excesivamente ocupados por vegetación y, a veces, con problemas para dejar pasar las avenidas. Curiosamente, son los propios agricultores los que se quejan de que los ríos están “sucios” y hay que eliminar toda esa vegetación.

Anoxia en los embalses. Si un río con alta concentración de nutrientes es embalsado, como ocurre por ejemplo en el tramo medio-bajo del Ebro, empieza otra cadena de problemas ligados al crecimiento brutal de algas (Figura 12). Los embalses permanecen estratificados en verano, tanto térmicamente como en otros parámetros: conductividad, oxígeno disuelto, turbidez, pH, etc. En profundidad, el oxígeno disuelto es rápidamente consumido por el fitoplancton. Si en esas circunstancias se abren compuertas o válvulas, se puede provocar mortandades de peces, como la que ocurrió el 13 de agosto de 2022 aguas abajo de la presa de Ribarroja, donde murieron 5000 peces.



Figura 12: Proliferación de algas en el embalse de Ribarroja. Diciembre 2022.

Hay bacterias que habitan en los embalses que son capaces de extraer el oxígeno de otros compuestos químicos, como los sulfatos o los nitratos. Las bacterias sulforeductoras liberan sulfhídrico, con desagradable olor a huevos podridos. También el ambiente reductor

disuelve el hierro y el manganeso, por lo que si se sirve agua con esas características, al cambiar a ambiente oxidante, esos metales precipitan, tiñendo las aguas de abastecimientos de colores ocres que alarman a la población.

Cianobacterias. En el verano, en embalses eutrofizados, pueden ocurrir episodios en los que el agua del embalse se vuelve verde (a veces fosforescente) por la proliferación o *bloom* de cianobacterias. Algunas de estas algas microscópicas pueden contener toxinas, que se clasifican en hepatotoxinas (la más temida es la microcistina), neurotoxinas, citotoxinas, irritantes y dermatotoxinas.

Cuando se detecta estas floraciones o “natas” en los embalses hay que analizar rápidamente el agua para confirmar o descartar la presencia de toxinas. En todo caso, hasta que no se demuestre lo contrario, hay que actuar con precaución. En la primavera de 2022 hubo que suspender una prueba de triatlón en el embalse de El Val (Zaragoza) por un *bloom* de cianobacterias. A mediados de diciembre de 2022 hubo otro en el de Ribarroja. En algunas ocasiones ha habido que cortar los abastecimientos.

Problemas para la salud. La potabilidad del agua

La Organización Mundial de la Salud (OMS) lleva advirtiendo décadas de los problemas sanitarios derivados de la ingesta frecuente de agua con altas concentraciones de nitratos, que se incrementan si las personas presentan infecciones gastrointestinales simultáneamente. Sobre todo, advierte de los problemas asociados a pozos privados, donde no se realizan controles periódicos.

El grupo de mayor riesgo son los bebés menores de seis meses, alimentados con leche artificial. El principal efecto es la metahemoglobinemia, es decir, un incremento de metahemoglobina en sangre, que la incapacita para fijar el oxígeno, provocando la cianosis. Otros colectivos también especialmente sensibles parecen ser las mujeres embarazadas, personas con hipoclorhidria gástrica, o con hemoglobina anómala.

No obstante, la fuente más importante de exposición humana al nitrato es a través de las verduras, productos cárnicos procesados (salchichas, hamburguesas, embutidos), cacao, cerveza y otras bebidas alcohólicas. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha lanzado recientemente una alerta ante el riesgo para la salud que supone la ingesta de nitrosaminas, altamente cancerígenas, especialmente en los productos cárnicos.

El Instituto de Salud Global de Barcelona ha apuntado, en 2023, que uno de los desencadenantes de cáncer de próstata puede ser la ingesta sostenida, a lo largo de la vida, de agua con altas cantidades de nitrato, incluso por debajo de los famosos 50 mg/l. Se ha trabajado con más de 1600 personas, y se ha observado que aquellos que tomaban más de 14 mg/día, multiplicaban por 1,5 la posibilidad de padecer este tipo de cáncer. No obstante, termina el trabajo indicando que una dieta rica en fibra, frutas, verduras y vitamina C puede neutralizar este peligro (DONAT-VARGAS *et al.*, 2023).

Lo que sí está claro es que las autoridades sanitarias han fijado, desde hace décadas, en 50 mg/l el límite de la potabilidad, y esto hace que muchos abastecimientos, en zonas agrícolas, presenten problemas crecientes. En España, según el “Informe monográfico sobre presencia de nitratos y plaguicidas en las aguas continentales. Especial referencia a las aguas de consumo humano”, elaborado por el MITERD en 2022, 17 abastecimientos de aguas superficiales presentan concentraciones de sus aguas entre 25 y 50 mg/l de nitratos, y 4 por encima de 50 mg/l. En lo referente al agua subterránea, 99 abastecimientos se sitúan entre 37,5 y 50 mg/l y 117 superan los 50 mg/l (MITERD, 2022).

En Aragón, por ejemplo, ha ido incrementándose el número de localidades que ya no pueden abastecerse de sus pozos o manantiales, alcanzando actualmente la cifra de 35. Quizá uno de los casos más curiosos es el de Plasencia del Monte, en Huesca, donde la población se manifestó cortando la carretera N-240, en protesta por la contaminación de su propio pozo, contaminación que habían provocado ellos mismos con el inadecuado abonado de sus campos.

En la Hoya de Huesca varias localidades han tenido que dejar de utilizar sus fuentes de abastecimiento. En vez de intentar revertir la situación evitando la contaminación, están optando por la conexión a la red de abastecimiento de la ciudad de Huesca. En otros casos, hay puntos de agua dentro de su término municipal todavía no afectados, o bien se pueden perforar nuevos pozos alejados o más profundos. También es a destacar el caso del río Tastavins (Teruel), que estuvo circulando durante más de un año con concentraciones superiores a 80 mg/l, impidiendo el abastecimiento de La Portellada y La Fresneda. El Servicio Geológico de la Diputación de Teruel tuvo que actuar de urgencia captando un acuífero menos contaminado.

Por último, algunas localidades optan por instalar plantas para reducir la concentración de nitratos. Hay dos tecnologías actualmente en uso, las de Separación (ósmosis inversa, resinas aniónicas y electrodiálisis) y las de Transformación (eliminación catalítica y

desnitrificación biológica). Las primeras precisan bastante energía y generan descargas concentradas que hay que almacenar y gestionar. Por lo general, en ambientes poco tecnificados, no termina de funcionar ninguna de las dos.

Legislación

Desde 1958, la OMS publica periódicamente las “Guías para la calidad del agua potable”, que pretenden mejorar la calidad del agua potable y la salud humana al ser usadas como base para la regulación de los estándares de agua potable en los países. La última guía es del año 2022. En lo referente a los nitratos, mantiene desde el comienzo la cifra de 50 mg/l como límite de la potabilidad. Se basa en la ausencia de efectos en la salud (meta-hemoglobinemia y efectos tiroideos) en los estudios epidemiológicos y en la protección de los lactantes alimentados con biberón y, en consecuencia, a otros grupos de la población.

En Europa contamos, desde el año 1975, con la Directiva 75/440/CEE relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable. Asume el valor de 50 mg/l establecido por la OMS. Años después, visto que la problemática de los nitratos se estaba incrementando, se promulgó otra específica (91/676/CEE) relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura.

Es muy interesante leer las consideraciones que llevaron a la elaboración de esta Directiva. Por un lado se habla de que el uso excesivo de fertilizantes es un riesgo para el medio ambiente, y que se precisan iniciativas comunes para controlar los problemas ocasionados por la ganadería intensiva. Pretende, claramente, reducir la contaminación y proteger la salud humana y los ecosistemas acuáticos. Quiere fomentar las prácticas agrarias correctas y proteger especialmente algunas zonas. Espera que los programas de acción limiten la aplicación de fertilizantes y, específicamente, de abonos animales, y es consciente de que la situación hidrogeológica de algunos países es tal que tendrán que transcurrir muchos años antes de que las medidas de protección produzcan una mejora de la calidad de las aguas.

El artículo 1 establece el objetivo de la Directiva: “reducir la contaminación causada o provocada por los nitratos de origen agrario, y actuar preventivamente contra nuevas contaminaciones de dicha clase”. Es decir, en el año 1991, Europa asume que una parte de sus aguas están afectadas significativamente por los nitratos, que hay que revertir esa situación, proteger las zonas no afectadas, y actuar preventivamente ante otros compuestos utilizados en el abonado y tratamiento de los cultivos.

Para ello establece que, cada cuatro años, los países miembros tendrán que determinar las aguas afectadas, las aguas en riesgo de estarlo, y las denominadas “Zonas vulnerables”, es decir, áreas amplias que están contribuyendo a esa contaminación. Para cada zona vulnerable hay que establecer un programa de actuación que revierta la situación, con su correspondiente programa de control que evalúe su eficacia, y anima a los países a declarar vulnerable todo su territorio nacional. Además, si los programas no se muestran eficaces, habilita a los Estados miembros a adoptar medidas adicionales o acciones reforzadas. El umbral para determinar que un agua está afectada por nitratos es de 50 mg/l. Para lagos, embalses, estuarios, aguas costeras y marinas remite a la determinación de su estado trófico.

En los anejos de la Directiva se pormenorizan lo que se entiende por “Códigos de buenas prácticas agrarias”, es decir, aquellos que deben aplicarse independientemente de si se está o no en una zona vulnerable. Cada país puede particularizar por regiones, pero tiene que regular, entre otras cuestiones: periodos en los que no conviene abonar; cómo actuar en terrenos inclinados, inundables, cercanos a cauces, que se hielan; cómo tienen que ser las balsas de almacenamiento de estiércoles; cómo deben aplicarse los fertilizantes químicos y estiércol, y si hay que hacer rotación de cultivos.

Para los “Programas de acción”, es decir, los que se aplican en las zonas vulnerables, los temas que se abordan son similares, pero ya no son recomendaciones sino obligaciones: periodos en los que está prohibido abonar; capacidad suficiente de las balsas de almacenamiento de estiércoles, que permita “aguantar” sobradamente todo el periodo de prohibición; necesidad de realizar analíticas del suelo antes de abonar, y limitación de estiércol aplicable a 170 kg N/ha, con carácter general.

La Directiva daba un plazo de dos años a los países miembros para su trasposición: España tardó más de cuatro, pero al final promulgó el RD 261/1996 sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias. Una de las características de este decreto es que regulaba aquellos aspectos que eran competencia del Estado y delimitaba cuáles son de las Comunidades Autónomas. El Estado, a través de las Confederaciones Hidrográficas y su Dirección General del Agua, asumía las redes de control y la determinación de las aguas afectadas. Las Comunidades Autónomas, con prácticamente todas las competencias de agricultura y ganadería, asumían la declaración de las Zonas vulnerables, los Códigos de buenas prácticas agrarias, y los Programas de acción.

Apenas seis años después, la Comisión Europea abrió un procedimiento de infracción contra España (referencia 2002/2009), ya que consideraba que no se estaban realizando suficientes esfuerzos en redes de control, declaración de Zonas vulnerables y Programas de acción. Hubo numerosas reuniones, nuevos informes, mejora en la coordinación Estado-Comunidades Autónomas, y finalmente, en el año 2011, se archivó el procedimiento.

Sin embargo, en el año 2015, la Comisión Europea comunicó a España la apertura de un procedimiento piloto (7849/15/ENVI), paso previo a la apertura de un procedimiento de infracción. Consideraba que no se estaba aplicando convenientemente la Directiva en cuanto a los criterios sobre designación de Zonas vulnerables, evaluación de los Programas de acción, y medidas de control de éstos. Las respuestas no se consideraron suficientes, y en 2018 se inició un nuevo procedimiento de infracción (2018/2250), argumentando que las redes de control eran poco estables, no se declaraban adecuadamente las Zonas vulnerables, los Programas de acción eran incompletos, y no se adoptaban medidas adicionales o reforzadas.

Se realizaron reuniones bilaterales, y se fijaron dos fechas para ir aportando la documentación que se requería. España pidió una prórroga de un año, pero se desestimó. La información entregada se consideró insuficiente. En julio de 2020, la Comisión Europea presentó un Dictamen motivado, y en diciembre de 2021 denunció a España ante el Tribunal de Justicia de la UE.

Entre tanto, el gobierno de España sacó a información pública un nuevo decreto sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, que finalmente vio la luz en enero de 2022 (RD 47/2022). Este decreto sustituye al de 1996. Los objetivos del decreto son armonizar la diferente legislación existente, sobre todo lo relacionado entre nitratos y Directiva marco del agua (2000/60/CE), Directiva de aguas subterráneas (2006/118), así como con la de aguas destinadas al consumo humano (UE) 2020/2184. Se ha aprovechado para rebajar los límites para considerar un agua afectada y se ha facultado a los organismos de cuenca para adoptar medidas adicionales y acciones reforzadas.

Los nuevos límites que España considera para determinar que un agua está afectada por la contaminación por nitratos son 25 mg/l en el caso de agua superficial, y 37,5 mg/l para la subterránea. Para lagos, embalses, estuarios, aguas de transición y costeras se atenderá a lo que dice el RD 817/2015 por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.

Los Programas de acción tendrán que someterse al procedimiento de Evaluación ambiental estratégica, y deberán ser informados por los organismos de cuenca. Además, para reforzar la protección de las aguas y evitar una indeseada concentración de presiones que, en su conjunto puedan impactar sobre las masas de agua, las confederaciones hidrográficas podrán establecer limitaciones a nuevas concesiones y a otras actividades sujetas a su autorización. Deberán, también, incrementar las frecuencias de muestreo de las redes, y establecer una red específica de los retornos de las principales zonas regables.

Otro reglamento que también incide en la problemática de la contaminación difusa es el RD 1051/2022 por el que establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios. Según esta reciente legislación, toda explotación agrícola tendrá que registrar las fertilizaciones que realice en una nueva sección del “cuaderno de la explotación”, donde hasta ahora sólo se anotaba la aplicación de productos fitosanitarios. Además, tendrán que elaborar un plan de abonado a partir del 1 de septiembre de 2024. El Decreto establece los periodos de prohibición de fertilización nitrogenada para diferentes cultivos, la imposibilidad de aplicar purines con sistema de plato o abanico, y limita a cinco días el tiempo en el que se podrán apilar estiércoles.

La Confederación Hidrográfica del Ebro ha incluido en su último plan hidrológico, aprobado por el Consejo del agua de la cuenca en abril de 2022 (RD 35/2023), medidas para la reducción de entre un 10 y un 40 % de la aplicación de nitrógeno, según el estado de las masas de agua subterránea. Estas cifras surgen de la aplicación del modelo PATRICAL, que para toda España realiza la Universidad de Valencia. También, en la parte normativa, se han incluido algunos artículos que prohíben la instalación de granjas en zonas de policía de cauces, así como el abonado orgánico de parcelas que cartográficamente se consideran Dominio Público Hidráulico.

Estrategias

A nivel mundial, la ONU, a través de la FAO, ha estado siempre preocupada por erradicar el hambre en el mundo. Ningún programa o estrategia contemplaba reducir el uso de fertilizantes; como mucho, abogaba por formar a los agricultores para que optimizaran su uso. Sin embargo, la última COP 15 de Montreal, sobre Biodiversidad, celebrada en diciembre de 2022, ha conseguido el acuerdo de 188 países para, entre otros objetivos, “reducir a la mitad tanto el exceso de nutrientes como el riesgo general planteado por pesticidas y productos químicos altamente peligrosos” para finales de esta década.

En la Unión Europea, las estrategias sobre Biodiversidad y “de la granja a la mesa” del Pacto verde europeo establecen el objetivo común de reducir las fugas de nutrientes en el medio ambiente en al menos un 50 %, de aquí a 2030. Para ello estiman que habrá que reducir un 20 % el uso de fertilizantes. Las estrategias europeas son anteriores a las de la ONU y, claramente, le han servido de inspiración.

España ha centrado todos sus esfuerzos en esta materia en la modificación del reglamento de nitratos y en el de nutrición sostenible de suelos agrarios. La Confederación Hidrográfica del Ebro, desarrollando el artículo 8.4 del decreto de nitratos, ha elaborado la denominada estrategia “NitraCHE”. Son varios los motivos que le han llevado a ello, entre los que se encuentran las recomendaciones realizadas desde la propia Dirección General del Agua, o los resultados de las redes de control. Pero lo que quizá más ha influido para su elaboración es el crecimiento imparable de la cabaña ganadera, especialmente la de cerdos, que mantiene un ritmo de 400.000 cerdos/año (CHE, 2022).

El área de Calidad de las aguas de la Comisaría de aguas del Ebro ha realizado una priorización de las masas de agua más afectadas, y en las que es más urgente limitar la implantación de nuevas granjas que pretendan aplicar los purines como abono en los campos. Al final, se han seleccionado unas áreas, que suponen el 11,8 % de la cuenca, en las que no se otorgarán concesiones de agua para granjas, ni autorizaciones relacionadas con el Dominio Público Hidráulico (Figura 13). Otras medidas de la estrategia hacen referencia al contenido de los informes en las Autorizaciones ambientales integradas, al incremento de la vigilancia en campo, a la mejora de las redes de seguimiento, a la potenciación de la finca La Melusa para experimentación sobre la contaminación difusa, y a la divulgación de la estrategia.

Proyectos de investigación y tesis doctorales

Son numerosos los proyectos que, desde las administraciones y centros de investigación, y casi siempre con apoyo europeo, se han realizado en las dos últimas décadas con el objetivo de intentar revertir la creciente contaminación difusa. Los proyectos LIFE son los que han predominado, pero también ha habido convenios con grandes sistemas de regadío. En este apartado nos centraremos exclusivamente en la cuenca del Ebro.

La Confederación Hidrográfica del Ebro suscribió varios convenios con el CITA (Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria), entre los años 2003 y 2017, para el control y balance de nutrientes en los grandes sistemas de riego. Los trabajos abordaron el monitoreo

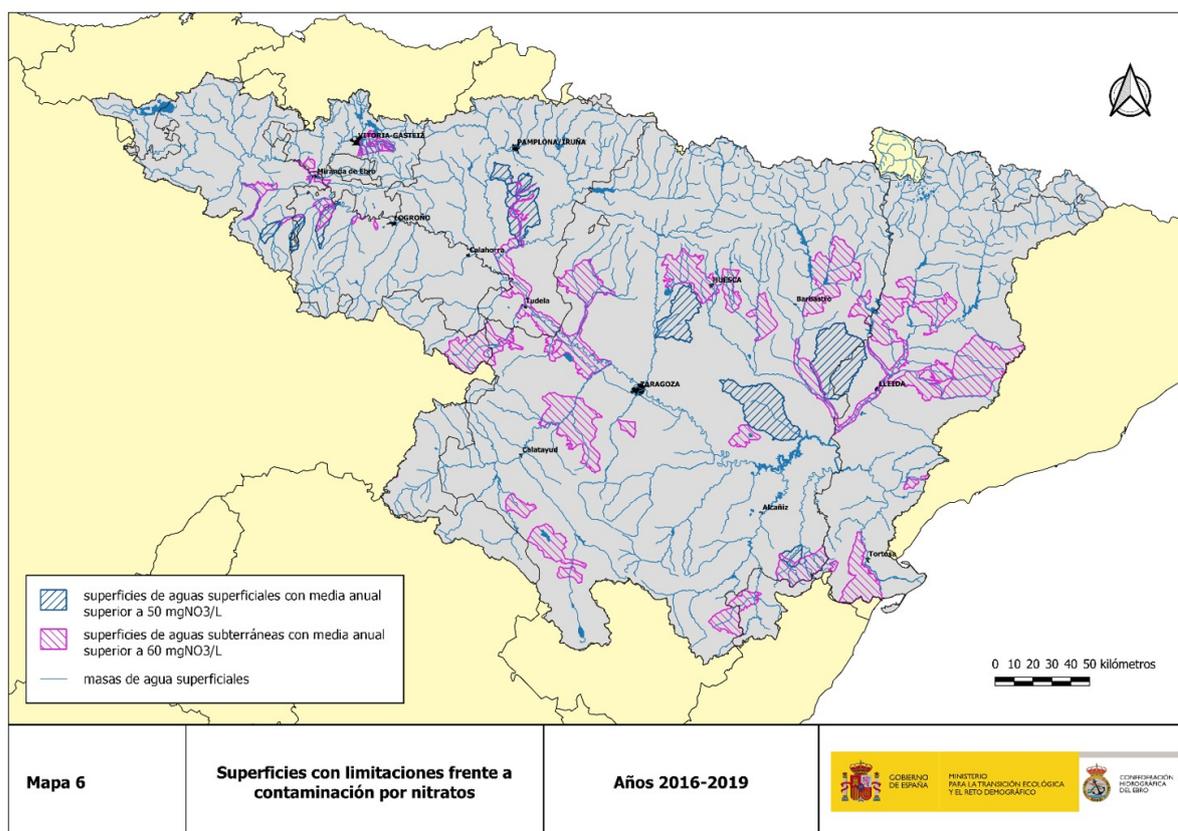


Figura 13: Mapa que muestra las zonas con restricciones a la implantación de nuevas granjas en la cuenca del Ebro (CHE, 2022).

exhaustivo de entradas y salidas en cinco cuencas: Alcanadre, barranco de la Violada, Valcuerna, Clamor Amarga y Arba. Se medían caudales y concentraciones de salinidad y nitratos, se evaluaba con encuestas y estudios de campo lo que realmente se cultivaba y abonaba en los campos, y se hacían balances anuales. Fue especialmente interesante ver la evolución, a lo largo de todos esos años, de modernizaciones de zonas regables, pasando de riego por inundación a riego por aspersión (GARCÍA *et al.*, 2010).

El CITA, a su vez, colaboró con Riegos del Alto Aragón en la construcción y seguimiento de una red específica, con 7 puntos de control, en los principales colectores de la zona regable. Se construyeron secciones de aforo adaptadas a las condiciones del cauce: aforadores tipo Parshall, vertederos triangulares, vertederos de pared ancha, etc (ISIDORO, 2013). La masa exportada de nitrógeno anual se sitúa sobre los 25 kg/ha, con puntas de hasta 58 kg/ha algún año concreto y en zonas donde predomina el cultivo del maíz. También se realizó seguimiento y balance de fósforo, salinidad y plaguicidas (DECHMI *et al.*, 2013).

Los proyectos LIFE desarrollados han buscado demostrar y ayudar a los agricultores en la implementación de mejores prácticas agrarias, especialmente en la gestión y aplicación de estiércoles y purines. En el valle del Ebro destacan los proyectos LIFE realizados tanto en Aragón como en Navarra y Cataluña.

- LIFE06 ENV/E/000044-ES-WAMAR (2006-2011, SODEMASA): “Gestión medioambiental correcta y sostenible del purín porcino basada en tecnologías innovadoras: proyecto de demostración llevado a cabo en Aragón (España)”. En función de las características de cada una de las tres zonas, se adaptó su forma de trabajo mediante la valorización agrícola, el transporte y almacenamiento, o bien mediante el tratamiento del purín. En las comarcas del Maestrazgo y Cinco Villas se optó por un modelo de valorización agrícola dada la disponibilidad de terreno de cultivo suficiente en las zonas de producción de purín. En el caso de Peñarroya de Tastavins se construyó una planta de tratamiento biológico que, a través de una red de colectores, conectaba directamente las explotaciones con la planta. El centro gestor del Maestrazgo coordinó a 48 ganaderos de porcino y 95 agricultores. En Tauste se recogían los purines de 69 granjas (210.000 m³) y se aplicaban ordenadamente en una superficie de 16.700 ha (358 agricultores). En Peñarroya de Tastavins aportaban sus purines 39 explotaciones (SODEMASA, 2011).
- LIFE09 ENV/ES/000453 LIFE+MANEV (2011-2016, SARGA): “Evaluación de la gestión y tecnologías de tratamiento de estiércol para la protección medioambiental y la sostenibilidad de la ganadería en Europa”. Se trata de una continuación del anterior, en el que han colaborado hasta 8 entidades europeas. Tras una evaluación de la situación en Europa (148 millones de cerdos y 88 millones de vacas), y analizadas las 20 diferentes tecnologías de tratamiento existentes (acidificación, separación sólido-líquido, digestión anaerobia, compostaje, fitodepuración, etc.), se estudiaron 9 casos. El producto final del proyecto es la aplicación MANEV, cuyo objetivo es ayudar a la toma de decisiones a la hora de implantar un sistema de gestión de estiércoles. El programa agrupa las tecnologías de tratamiento de los estiércoles en cuatro: las que facilitan su manejo, de valorización, de eliminación de nutrientes y de recuperación de nutrientes (SARGA, 2016).
- LIFE16 ENV/ES/000400 ARIMEDA (2017-2021, CITA): “Reducción de las emisiones de amoníaco en la agricultura mediterránea mediante técnicas innovadoras de fertirrigación con purines”. Se llevó a cabo en Aragón y Lombardía. Se realizaron experiencias en

las que se fertirrigaba con la fracción líquida de los purines, observándose reducciones de emisiones a la atmósfera del 76 %, en riego con pivot, y 90 % en riego por goteo (CITA, 2021).

- LIFE+10 ENV/ES/478 LIFENitratos (2011-2015, INTIA): “Repercusión de las prácticas agrarias en la contaminación por nitratos de las aguas continentales”. Se estudiaron tres cuencas navarras de características muy diferentes en cuanto a abonado y permeabilidad (Landazuría, Oskotz-Muskitz y aluvial del Ebro). También se trabajó a nivel de parcela y microparcela o ensayo. Se considera fundamental determinar, aunque sea de forma sencilla, el nitrógeno mineral existente en el suelo si se quiere realmente no provocar contaminación. Además, el proyecto desarrolló una herramienta informática para calcular el balance de nitrógeno (MUJICA *et al.*, 2012).
- LIFE 16 ENV/ES/287 (2017-2021, INTIA): “Gestión colectiva de cultivos al servicio de programas ambientales relacionados con el uso y la calidad del agua”. Es continuación del LIFE Nitratos. El principal resultado de este proyecto ha sido un innovador sistema de plataformas digitales: AGROgestor y AGROasesor que ayuda a la toma de decisiones. Se han desarrollado 12 proyectos piloto demostrativos en 9 ámbitos geográficos españoles, para apoyar la transformación digital en el sector agrario (INTIA, 2022).
- LIFE 12 ENV/ES/000647 Futur agrari (2013-2017, Generalitat de Catalunya): “Innovación para la gestión sostenible de las deyecciones ganaderas desde la granja al suelo”. Desarrollado en Cataluña, tenía tres objetivos: reducción en origen y tratamiento de los purines (gestión del agua, dietas, y separación sólido-líquido), optimización de la fertilización (herramientas informáticas, teledetección y maquinaria innovadora de aplicación de fertilizantes), y extracción de nutrientes excedentarios (intercalación de cultivos captadores de nitrógeno, plantaciones combinadas de árboles y cultivos, y plantaciones lineales de especies leñosas en el límite de la parcela) (GENERALITAT DE CATALUNYA, 2017).
- LIFE 18 ENV/ES/000335 Nirvana (2019-2022, CETAQUA): “Remediación sostenible de aguas subterráneas in situ”. Pretende reducir las concentraciones de nitratos en acuíferos mediante la inyección de pequeñas cantidades de nanopartículas de hierro cerovalente en el acuífero para favorecer la actividad de las bacterias desnitrificadoras. Se está realizando un proyecto piloto en el acuífero de Zarandona, utilizado por Aguas de Murcia (CETAQUA, 2022).

En lo referente a tesis doctorales que, sobre la temática de nitratos se han desarrollado en las últimas décadas en la cuenca del Ebro, destacan las siguientes:

- “*Impacto del regadío sobre la calidad de las aguas del barranco de la Violada (Huesca): salinidad y nitratos*”. Daniel Isidoro (1999). En este barranco, tributario del río Gállego, de 5.282 ha, existen 3.863 ha de regadío. En 1995 un 24 % del nitrógeno aplicado fue lixiviado, resultando un excedente de 66 kg N/ha. En 1996 las cifras fueron de un 22 % y 70 kg N/ha. Se observaron incrementos importantes de la concentración de nitratos tras la aplicación de riegos al maíz (ISIDORO, 1999).
- “*Repercusiones medioambientales de la agricultura sobre los recursos hídricos de la Comunidad de regantes nº V de Bardenas (Zaragoza)*”. Jesús Causapé (2002). Se realizó el seguimiento del sistema agrario, así como de las aguas superficiales en tres subcuencas (1999-2000) y de las subterráneas (2000-2001). En el acuífero, la salinidad media se situaba en 890 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la concentración de nitratos en 94 mg/l. En los barrancos los datos respectivos fueron 870 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 55 mg/l (CAUSAPÉ, 2002).
- “*Evaluación y vigilancia agroambiental de los regadíos del Ebro. El caso de Bardenas*”. Jesús Causapé (2009). En su segunda tesis doctoral, ya en el IGME, desarrolló el programa informático EMR (Evaluador Medioambiental de Regadíos). El exceso de nitrógeno en la cuenca del río Arba (59.200 ha de regadío) fue de 35 kg N/ha en el año 2004, 28 en el 2005, 18 en el 2006 y 24 en el 2007. El aprovechamiento del agua se evaluó en el 83 % (CAUSAPÉ, 2009).
- “*Evaluación de alternativas de gestión del regadío tradicional para la reducción del impacto agroambiental*”. Iker García (2010). Desarrollada en el IGME, es continuación de los estudios sobre la Comunidad de regantes nº V de Bardenas, con 15.500 ha de regadío. Se monitorizó la red de desagües entre los años 2000 y 2007. En el caso del maíz, por ejemplo, los agricultores aplican un 70 % de más de nitrógeno (GARCÍA GARIZÁBAL, 2010).
- “*Impactos ambientales del riego: la transformación de la cuenca de Lerma (Zaragoza, España)*”. Raphael Abrahao (2010). Elaborada en el IGME estudia una pequeña cuenca del sistema de riegos de Bardenas, con 752 ha. Se monitorizó exhaustivamente entre los años 2004-2005 y 2006-2008, a la vez que se ponía en regadío. Destaca que la concentración de sales bajó un 20 % mientras que la de nitratos subió. La eficiencia del riego se estimó en un 72 % (ABRAHAO, 2010).

-“*Evolución del impacto agroambiental por la transformación en riego*”. Daniel Merchán (2015). Desarrollada también en el IGME, es continuación de los estudios sobre la cuenca de Lerma. Se observa una pauta estacional. La eficiencia del riego resulta del 76 %. Se pasó de una exportación de 11,4 kg N/ha en situación de secano, a 30,8 kg N/ha tras la puesta en regadío (MERCHÁN, 2015).

-“*Impacto de la modernización del regadío sobre la cantidad y calidad de los retornos de riego*”. María Teresa Jiménez Aguirre (2017). Desarrollada en el CITA, se centra en la evolución de una cuenca de 5000 ha: el barranco de La Violada (Riegos del Alto Aragón), donde se ha procedido a la modernización del regadío. Compara los valores obtenidos por Daniel Isidoro en los años 1995-1998 con los obtenidos por ella entre 2011 y 2015. Las cifras que obtiene son: se utiliza un 36 % menos de agua en la zona; por el barranco de La Violada retorna un 69 % menos; aumenta un 20 % el agua consumida por los cultivos; se incrementa la eficiencia del riego del 56 % al 80 %; se aplica un 4 % más de nitrato, principalmente por las dobles cosechas; se reduce un 68 % las sales exportadas; disminuye un 72 % los nitratos exportados, pasando de 427 a 162 t/año (JIMÉNEZ AGUIRRE, 2017).

Posibles acciones preventivas y correctoras

Como en casi todos los problemas, lo mejor que se puede hacer siempre es prevenir. Es preciso continuar concienciando a los agricultores y ganaderos para que hagan un correcto uso de los abonos, lo que además les repercutirá en un ahorro económico. Cuando se acude a charlas y reuniones con el sector agroganadero y se les explica las consecuencias ambientales y sanitarias que genera su actividad, es frecuente escuchar que no eran conscientes del problema, o que era la primera vez que alguien se lo explicaba. Quizá hace años era comprensible, pero ahora administraciones, organizaciones agrarias y grandes sistemas de riego están haciendo esfuerzos por sensibilizar y dar formación.

En esta línea destacan las jornadas que organizan tanto el Canal de Aragón y Cataluña como Riegos del Alto Aragón. También las diferentes administraciones están intentando llegar al sector con cursos, charlas y jornadas. Las 48 OCAS (Oficinas Comarcales Agroambientales) de Aragón se esfuerzan por hacer llegar estos mensajes. La Unión Europea está forzando a que se den estos pasos, apoyando proyectos LIFE y condicionando las ayudas de la PAC.

Algunos fabricantes de abonos están trabajando en lo que se denominan “inhibidores de la nitrificación”, compuestos que retrasan la transformación del nitrógeno amónico en nitrógeno nítrico, y por lo tanto lo mantienen disponible para las plantas, retardando durante algunos días su posible lixiviación. Estos productos bloquean temporalmente la acción de la enzima mono-oxigenasa de amonio en las bacterias *Nitrosomonas ssp.* Están muy generalizados en la agricultura de Estados Unidos y Canadá.

También se está investigando en la utilización de bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, tal como hacen las leguminosas (lentejas, alubias, guisantes, trébol, alfalfa, etc.). En realidad, más que solucionar el problema, lo que permite es tener que aplicar bastante menos abono, con el consiguiente menor riesgo de percolación. Dentro de las bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno hay dos grupos: las bacterias móviles del suelo, denominadas rizobios, y los actinomicetos que se fijan en las raíces. Las bacterias *Azotobacter*, *Rhizobium* y *Azospirillum* son las más empleadas como biofertilizantes.

En el campo de la prevención, y especialmente la orientada a la protección de abastecimientos, la legislación española de aguas establece la figura de los Perímetros de Protección. Desde el punto de vista hidrogeológico, puede establecerse el área cuya recarga alimenta un manantial o un pozo que es utilizado para abastecimiento. Existen diferentes métodos para su determinación, y normalmente se establecen tres zonas, en función de su cercanía a la captación, siendo la más cercana aquella en la que más limitaciones se aplican. Esta figura, sin embargo, apenas se ha implementado. En la cuenca del Ebro sólo hay establecidos dos perímetros, Arteta, en Navarra (abastecimiento de Pamplona) y San Julián de Banzo, en Aragón (abastecimiento de Huesca). Es habitual solicitar su declaración a la Confederación pero, cuando se empiezan a vislumbrar las restricciones que el ayuntamiento tendrá que aplicar sobre el territorio, se suele decaer en el empeño.

Una vez que la contaminación difusa ha escapado del suelo, puede intentarse evitar que llegue a ríos, embalses y humedales. Para ello la ciencia trata de imitar lo que hace la naturaleza. En los últimos años se están desarrollando experiencias de filtros verdes o humedales cuyo objetivo es reducir los nutrientes que llegan a los ecosistemas acuáticos.

Quizá una de las experiencias con más éxito es el Tancat de la Pipa, en la Albufera de Valencia, que lleva funcionando desde el año 2008. Se trata de un conjunto de humedales de 40 ha, junto al famoso lago litoral de importancia internacional (RAMSAR). Parte de los retornos de la zona regable del entorno de la Albufera son conducidos al Tancat. Tras fluir por las parcelas que forman el filtro verde, el agua pasa a unas lagunas y posteriormente es bombeada al lago, con una calidad notablemente mejorada. La Confederación Hidrográfica

del Júcar, propietaria de las parcelas, firmó un acuerdo de custodia del territorio con dos ONG: AE-Agró y SEO-BirdLife. El espacio cuenta con un Plan de Uso y Gestión y está abierto al público. Los resultados obtenidos son muy positivos en términos de nutrientes: para el nitrógeno total se ha reducido un 51 % y para el fósforo un 43 %. Además se han registrado episodios de alta contaminación que han sido laminados por el humedal (GIMÉNEZ *et al.*, 2020).

Otros dos humedales de características similares se construyeron en el Delta del Ebro entre los años 2010 y 2013, por la empresa pública ACUAMED, dentro de las actuaciones del PIPDE (Plan Integral de Protección del Delta del Ebro). Los humedales se asientan sobre antiguos arrozales que fueron expropiados. El de la margen izquierda (Illa de Mar) presenta una superficie de 43 ha y un caudal de diseño de 650 l/s. El de la derecha (L'Embut) se extiende sobre 87 ha y trata un caudal de 1000 l/s. En ambos la profundidad oscila entre 0,3 y 1 m, y las especies implantadas son enea (*Typha sp.*) y carrizo (*Phragmites australis*). Las campañas de muestreo indican una reducción del 85 % de nutrientes, y una disminución también importante de materia en suspensión y plaguicidas. Se realiza seguimiento de avifauna, ictiofauna y vegetación, y se han convertido en parte del Parque Natural del Delta (DELGADO y HERNÁNDEZ, 2019).

En la cuenca del río Flumen (Huesca) se llevó a cabo el proyecto LIFE 09 ENV/ES/000431 CREAMAGUA (2011-2014, Comarca Los Monegros): “Creación y restauración de ecosistemas acuáticos para la mejora de la calidad del agua y la biodiversidad en las cuencas agrícolas”. Se establecieron unos criterios científico-técnicos, sociales y económicos, y se seleccionaron 16 humedales, de los cuales 11 están vinculados al río y son restauración de existentes, mientras que 5 son de nueva creación y están fuera del río. En total hay 78 ha permanentemente inundadas, 60 temporales y 400 consideradas zonas de amortiguamiento. La eliminación de nitrato se estima entre el 80 y el 100 %, antes de alcanzar el río. Dentro de este proyecto se ha realizado una importante labor de sensibilización y divulgación (COMARCA DE MONEGROS, 2014).

La Confederación Hidrográfica del Ebro ha sacado a licitación la construcción, por 388.000 euros, de un sistema de humedales depuradores en su finca La Melusa, en el Canal de Aragón y Cataluña. El proyecto pretende ser demostrativo y quiere extenderse, posteriormente, a otras zonas del área regable. Contempla captar agua del escuridero de Oliols, que actualmente presenta concentraciones medias de 50-60 mg/l de nitrato; luego, se hará circular lentamente por 4 lagunas encadenadas para la reducción de la carga de nutrientes. La superficie de la parcela es de 10,7 ha, de las cuales serán lagunas 5,5 ha; el resto

se plantará de especies ribereñas. El caudal de entrada habitual será de unas decenas de litros por segundo, aunque se ha previsto que pueda absorber puntas de hasta 600 l/s. El volumen de excavación total se ha estimado en 83.000 m³, y el tiempo medio de permanencia del agua en el sistema de lagunas en 5,3 días.

Otra idea que tiene la Confederación Hidrográfica del Ebro es la construcción de un sistema de humedales en la cola del embalse de El Val, en la cuenca del río Queiles (Zaragoza), aprovechando fincas que se expropiaron. Este embalse presenta problemas serios de eutrofización y precisa de un conjunto de medidas para intentar revertir, aunque sea parcialmente, su situación.

Reflexiones finales

A pesar de todos los esfuerzos que se han llevado a cabo por parte de agricultores, ganaderos y Administraciones a lo largo de estos últimos 30 años, aún queda mucho trabajo por hacer para invertir las tendencias, y alcanzar los objetivos medioambientales que fijan los acuerdos internacionales, las estrategias, las directivas europeas y la legislación nacional.

En Países Bajos, seguramente el lugar con mayor concentración de contaminación difusa del planeta, han creado, a comienzos del año 2022, el Ministerio de Naturaleza y Nitrógeno, que ocupa Christianne van der Wal. A los ocho meses de empezar su andadura dimitió el ministro de Agricultura, tras un verano de fuertes tensiones en la calle. El Gobierno había prometido que reduciría la ganadería en un tercio y que dispondría de 25.000 millones de euros para compras de terrenos a los agricultores. También ha ideado un plan que contempla que entre un 20 y un 30 % de las granjas sean compradas, en un plazo de no más de 15 años.

En el informe español correspondiente al último cuatrienio 2016-2019 (MITECO, 2020) se hace un pronóstico sobre la evolución estimada para la calidad del agua subterránea. Utilizando el modelo PATRICAL se realiza una simulación en la que las zonas no vulnerables seguirían abonando como hasta ahora, y en las vulnerables se produciría una reducción del 25 % de los excedentes de nitrógeno. De los 1235 puntos de control afectados al comienzo del periodo, 612 saldrían de esa situación en el 2021 y 82 más en el 2027. Para los 451 puntos restantes habría que aplicar medidas adicionales.

El modelo PATRICAL resulta muy útil para estimar el esfuerzo que el sector agroganadero debería realizar para revertir la situación. Miguel Ángel Pérez-Martín concluye que la mayor parte de las masas de agua subterránea dejarían de estar afectadas con una reducción del 10-20 % en la aplicación de fertilizantes. En los casos más extremos habría que incrementarla hasta el 40 % (PÉREZ-MARTÍN, 2021).

En el caso de la cuenca del Ebro, aplicando el mismo modelo (CHE, 2022), se obtiene que para la porción de masas de agua subterránea declaradas Zonas vulnerables (11.929 km²) sería necesario reducir la fertilización:

- un 10 % en 1000 km² (9 % de la superficie).
- un 20 % en 4200 km² (38 % de la superficie).
- un 40 % en 2000 km² (18 % de la superficie).

Como se ha ido viendo, el panorama no es muy halagüeño. Estamos ya en el 2023 y vamos con retraso en relación con lo que la propia España pronosticó en su último informe a la Comisión europea. Los escenarios de reducción de abonado es posible simularlos, pero conseguir que se lleven a la práctica, campo a campo, usuario a usuario, requiere mucho trabajo de concienciación y control posterior.

A lo largo del discurso, se ha puesto el foco en los nitratos como principal indicador de la contaminación difusa de origen agroganadero. Sin embargo, no deja de ser una simplificación. Desde finales del siglo pasado se está haciendo un esfuerzo en el control de plaguicidas (insecticidas y herbicidas) que se utilizan de forma generalizada en la agricultura. La Confederación Hidrográfica del Ebro mantiene una red de 38 puntos y publica sus resultados, así como los informes anuales, en su web. Por ejemplo, en el último informe, destacan la presencia de metolacoloro, terbutilazina y desetilatrizona. En cinco muestreos se han detectado concentraciones totales superiores a un microgramo por litro, es decir, el doble que lo permitido para las aguas de consumo humano.

A la mayoría de los técnicos les sorprende que la Directiva de nitratos fijara en 170 kg N/ha el máximo aplicable, como estiércol, en zonas declaradas como vulnerables, y 210 kg N/ha en las no vulnerables. Parece que detrás de esta cifra hay un criterio de precaución, ya que además de nitrógeno, los estiércoles y purines incluyen los restos de todo lo que se les ha aplicado a los animales, bien en su dieta o en su tratamiento farmacológico.

En este sentido, son muy interesantes los estudios que se están desarrollando en el ICRA (Institut Català de Recerca de l'Aigua) sobre presencia de antibióticos veterinarios en el agua subterránea, procedentes del abonado con purines (MAS-PLA *et al.*, 2016).

Cuando se exponen estas ideas a los agrónomos y veterinarios, normalmente no se sienten cómodos. Según ellos, el problema está en las malas prácticas, no en la técnica en sí. Quizá lo que sería necesario, entonces, es más formación en los agricultores y ganaderos, sensibilidad medioambiental en los técnicos que les asesoran y en las organizaciones que les agrupan, y compromiso en los técnicos de las Administraciones competentes, que son los que tienen que vigilar. Se podría decir que, al igual que la contaminación es difusa, la responsabilidad también es algo difusa.

En otras actividades que generan contaminación, como las industriales o sencillamente el vertido proveniente de poblaciones, se tiende hacia una economía circular, con el vertido cero en el horizonte. El sector agroganadero, que es fundamental ya que da de comer a la humanidad, tendrá que caminar también en esa misma línea.

Agradecimientos

Agradezco a la Real Academia de Ciencias de Zaragoza que me haya elegido como uno de sus miembros. Agradezco, de forma especial, a su presidente, Antonio Elipe, y a la presidenta de la Sección de Naturales, M^a Victoria Arruga. Mi trayectoria profesional no destaca en el ámbito investigador y académico, y fue toda una sorpresa recibir la noticia de mi nominación. Agradezco especialmente a los que me propusieron, Andrés Pocoví y José Luis Simón, que supongo que vieron en mí alguna cualidad que desconozco y que puede que enriquezca el quehacer de la institución. Ambos fueron profesores míos, en tercero y en quinto de carrera, y aprendí de ellos no sólo Geología estructural, es decir a dibujar, a tomar datos en campo, a hacer representaciones e interpretaciones, sino otro montón de valores que sólo transmiten los buenos maestros: a dudar, a ir hasta el final, a no tener miedo a equivocarse, a no copiar, a echarle horas, a presentar bien los resultados. De ellos sigo aprendiendo ya que son personas íntegras, comprometidas y generosas. José Luis, además, se ha leído meticulosamente el discurso y me ha hecho aportaciones muy valiosas.

No puedo dejar pasar esta oportunidad sin traer aquí a Francisco Javier Martínez Gil, mi director de tesis, hidrogeólogo holístico, padre de la Nueva Cultura del Agua y de la *Fluviolfelicidad*. Conversar con él es necesario, cada cierto tiempo, para saborear la vida, y ver más allá de lo que la sociedad de consumo nos pretende vender.

En la Confederación Hidrográfica del Ebro he crecido y desarrollado la parte más importante de mi vida profesional, desde el año 1991. El trabajo en equipos multidisciplinares y en diferentes unidades me ha enriquecido notablemente y me ha abierto a la limnología, la hidroquímica, la hidrodinámica, las especies exóticas invasoras, y también al derecho de aguas, a la participación pública, la resolución de conflictos o la atención a los medios de comunicación. Podría destacar a muchos compañeros, pero para no sonrojar en exceso, citaré sólo a Antonio Coch, un ingeniero de caminos con gran capacidad de escucha, a Lola Pascual, la primera presidenta de la CHE, experta en templar gaitas, y a Paco Hijos, un pozo de sabiduría.

Por mi formación como hidrogeólogo, ha sido habitual abordar la problemática de la contaminación por nitratos del agua subterránea. Con Felipe Delgado han sido muchas horas de trabajo. Sin embargo, los efectos medioambientales que implica el exceso de nutrientes en el agua los aprendí en el área de Calidad de las aguas, especialmente de Concha Durán, Vicente Sancho-Tello, Susana Cortés, M^a José Rodríguez, Patricia Navarro, Luis Rodríguez, Amparo Martín, y en general de las magníficas técnicas del Laboratorio.

Por último, traigo a esta sección de agradecimientos a mis colegas geólogos, montañeros, amantes de la naturaleza, amigos, hermanos, a mis padres que sembraron en mí, con amor, lo que ahora soy, y especialmente a mis hijos, Adrián, Irene y Rebeca, que ya casi sólo me dan alegrías. A mi esposa, Menchu, le dedico las últimas líneas: al igual que la Academia, algo ha debido de ver en mí, y juntos intentamos “alumbrar lo que perdura” sin venirnos abajo en el “tiempo de los intentos”.

Bibliografía

- Abrahao, R. (2010): *Impactos ambientales del riego: la transformación de la cuenca de Lerma (Zaragoza, España)*. Tesis doctoral. Zaragoza. 143 pp. https://www.igme.es/zaragoza/tesis/Abrahao_Tesis_2011.pdf
- Attenborough, D. (2021): *Una vida en nuestro planeta. Mi testimonio y una visión para el futuro*. Editorial Planeta. Barcelona. 317 pp.

- Candela, L. (1998): La contaminación de las aguas subterráneas por las actividades agrarias en España: visión de la investigación. *La contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. AIH-GE. Valencia, pp 53–63.
- Castiella, J.; Niñerola, S., Otamendi, A. y Solé, J. (1981): Los nitratos y su evolución en el acuífero aluvial del Ebro y afluentes entre Logroño y Cortes. *Jornadas sobre análisis y evolución de la contaminación de aguas subterráneas en España*. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. Tomo I, pp 67–81.
- Causapé, J. (2002): *Repercusiones medioambientales de la agricultura sobre los recursos hídricos de la Comunidad de regantes nº V de Bardenas (Zaragoza)*. Tesis doctoral. Zaragoza. 136 pp. <https://zaguan.unizar.es/record/3213>
- Causapé, J. (2009): *Evaluación y vigilancia agroambiental de los regadíos del Ebro. El caso de Bardenas*. Tesis doctoral. Zaragoza. 101 pp. <https://zaguan.unizar.es/record/3016>
- CETAQUA (2022): *Remediación sostenible de aguas subterráneas in situ*. <https://www.life-nirvana.eu/>
- CHE (2021): *Informe sobre la determinación de las aguas afectadas o en riesgo de contaminación por nitratos de origen agrario en la demarcación del Ebro (periodo 2016-2019)*. 283 pp. <https://www.chebro.es/documents/20121/0/CALSUBTER+NO3+%282016-2019%29+-+Informe.pdf/6d2f8e88-2d10-54e3-c615-96b5d39bfa71?t=1644010940429>
- CHE (2022): *Estrategia de la Confederación Hidrográfica del Ebro para la lucha contra el elevado contenido de nitratos en las aguas de la cuenca (Estrategia NITRACHE)*. 59 pp. <https://www.chebro.es/documents/20121/972743/Estrategia+NITRACHE+v3.0.pdf/c9b702a8-ea9e-b90c-3127-694dd3ca9ffc?t=1672318390744>
- CITA (2021): *Reducción de las emisiones de amoníaco en la agricultura mediterránea mediante técnicas innovadoras de fertirrigación con purines*. LIFE16 ENV/ES/000400 ARIMEDA. <https://www.lifearimeda.eu/>
- Comarca de Monegros (2014): *Creación y restauración de ecosistemas acuáticos para la mejora de la calidad del agua y la biodiversidad en las cuencas agrícolas*. <https://creamagua.com/>
- Comisión Europea (2021): *Informe de la Comisión al Consejo y al Parlamento europeo sobre la aplicación de la Directiva 91/676/CEE*. 14 pp. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/informe-2021_tcm30-532256.pdf
- Darwiche-Criado, N. y Comín, F.A. (2014): Tipificación de patrones espacio-temporales y en relación con las crecidas de NO_3^- , sólidos en suspensión y sales disueltas en la cuenca del río Flumen (Huesca). *Lucas Mallada* 16, pp 53–75.

- De Miguel, J.L.; Martínez, F.J.; Sánchez, J.A. y San Román, J. (1989): La contaminación por nitratos del sistema acuífero de Alfamén: primeros resultados. *VIII Conferencia sobre Hidrología General y Aplicada SMAGUA ' 89*, pp. 83–92, Zaragoza.
- Dechmi, F.; Clavería, I.; Balcells, M. e Isidoro, D. (2013): Seguimiento de la calidad y cantidad de los retornos de riego en Riegos del Alto Aragón. Estado de la Cuestión. *III Jornada técnica. Introducción a los sistemas de autocontrol de los retornos de riego en comunidades de regantes*. Monográfico Riegos del Alto Aragón. pp 25–36.
- Delgado, P. y Hernández, O. (2019): Los humedales artificiales del Delta del Ebro: infraestructuras verdes para la recuperación de servicios ecosistémicos. *III Congreso ibérico. Restauración fluvial*. Murcia. pp 590–598.
- Donat-Vargas, C.; Kogevinas, M.; Castaño-Vinyals, G.; Pérez-Gómez, B.; Llorca, J.; Vanaclocha-Espí, M.; Fernández-Tardón, G.; Costas, L.; Aragonés, N.; Gómez-Acebo, I.; Moreno, M.; Pollán, M. y Villanueva, C.M. (2023). Long-term exposure to nitrate and trihalomethanes in drinking-water and prostate cancer: a multicase control study in Spain. *Environmental Health Perspectives*. 12 pp. <https://doi.org/10.1289/EHP11391>
- Fernández, L. (2007): Los nitratos y las aguas subterráneas en España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 15.3 pp 257–265.
- Foster, S. (1998): Políticas de protección de las aguas subterráneas en Europa. *La contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. AIH-GE. Valencia, pp 24–36.
- García Garizábal, I. (2010): *Evaluación de alternativas de gestión del regadío tradicional para la reducción del impacto agroambiental*. Tesis doctoral. Zaragoza. 137 pp. <https://zaguan.unizar.es/record/5485>
- García Vera, M.A.; San Román Saldaña, J. y Sancho-Tello Valls, V. (2010). Agua, medio ambiente y retornos de regadío en la cuenca del Ebro. *Naturaleza Aragonesa* nº 24, pp 72–83.
- Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural (2017): *Innovación para la gestión sostenible de las deyecciones ganaderas desde la granja al suelo*. <http://www.futuragrari.cat/>
- Giménez, M.; Hernández, C.; Lassalle, M.; Martín, M.; Moreno, L.; Regidor, M.C.; Ribera, L.; Rodrigo, M.A.; Rueda, J.; Segura, M.; Valentín, A. y Vera, P. (2020): *10 años del Tanca de la Pipa*. MITERD.
- Grizzetti, B; Bouraoui, F. y Aloe, A. (2007): *Spatialised European nutrient balance*. Comisión Europea. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. 99 pp. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/8344>

- INTIA (2022): Gestión colectiva de cultivos al servicio de programas ambientales relacionados con el uso y la calidad del agua. LIFE 16 ENV/ES/287. <https://www.agrogestor.es/el-programa-life/>
- Isidoro, D. (1999): *Impacto del regadío sobre la calidad de las aguas del barranco de la Violada (Huesca): salinidad y nitratos*. Tesis doctoral. Lérida. 419 pp.
- Isidoro, D. (2013): Sistemática para la medición de caudal y el control de la calidad de los retornos de riego. *III Jornada técnica. Introducción a los sistemas de autocontrol de los retornos de riego en comunidades de regantes*. Monográfico Riegos del Alto Aragón. pp 16–24.
- Jiménez Aguirre, M.T. (2017): *Impacto de la modernización del regadío sobre la cantidad y calidad de los retornos de riego*. Tesis doctoral. Zaragoza. 236 pp. <https://digital.csic.es/handle/10261/158924>
- Llamas, R. (1981): Aspectos generales de la contaminación de las aguas subterráneas. Situación en España. *Jornadas sobre análisis y evolución de la contaminación de aguas subterráneas en España*. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. Tomo I, pp 9–27.
- López Geta, J.A. (1998): La contaminación de las aguas subterráneas por las actividades agrarias en España: la visión de la administración. *La contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. AIH-GE. Valencia, pp 39–52.
- Mas-Pla, J.; Boy-Roura, M.; Menció, A.; Portell, L.; Brusi, D.; Villagrasa, M.; Petrovic, M.; Gros, M.; Lekumberri, I.; Filoll, M. y Borrego, C. (2016). Interpretación de los resultados del estudio sobre la presencia y evolución de antibióticos en las aguas subterráneas del Baix Fluvià (Alt Empordà, Girona) en el contexto de la planificación hidrológica. *Congreso hispano-luso sobre las aguas subterráneas en el segundo ciclo de planificación hidrológica*. AIH-GE. Madrid, pp 289–295. https://www.aih-ge.org/wp-content/uploads/actas_congreso_Madrid.pdf
- Merchán, D. (2015): *Evolución del impacto agroambiental por la transformación en riego*. Tesis doctoral. Zaragoza. 183 pp. <https://zaguan.unizar.es/record/31613/files/TESIS-2015-054.pdf>
- MITECO. Dirección general del agua (2020): *Informe de seguimiento de la directiva 91/676/CEE. Cuatrienio 2016-2019*. 308 pp. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/informe-2016-2019_tcm30-518402.pdf
- MITERD (2022): *Informe monográfico sobre presencia de nitratos y plaguicidas en las aguas continentales. Especial referencia a las aguas de consumo humano*. 28 pp. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/2022-04-25-informe-nitratos-y-plaguicidas-abastecimientos_tcm30-539611.pdf

- Mujika, I.; Preciado, B. y Antón, R. (2012): Repercusiones de las prácticas agrarias en la contaminación por nitratos de las aguas continentales. *Navarra agraria*, 195, pp 39–44. <https://www.navarraagraria.com/categories/item/254-life-nitratos-repercusion-de-las-practic-as-agrarias-en-la-contaminacion-por-nitratos-de-las-aguas-continentales>
- Pérez-Martín, M.A. (2005): *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva marco del agua*. Tesis doctoral. Valencia. 387 pp. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/191462/Perez%20Mart%C3%ADn_Modelo%20distribuido%20de%20simulaci%C3%A3n%20del%20ciclo%20hidrol%C3%A3gico%20y%20calidad%20del%20agua%2C%20integrado%20en%20sistemas%20de%20informaci%C3%A3n%20geogr%C3%A1fica%20para%20grandes%20cuencas..pdf?sequence=4
- Pérez-Martín, M.A. (2021): Trayectorias de recuperación de acuíferos en la contaminación por nitratos. Modelo Patricial. *Jornada: La gestión de la contaminación difusa por nitratos en la agricultura de regadío. MAPA-SG Regadío, caminos naturales e infraestructuras rurales*. https://www.mapa.gob.es/images/es/ponencia3_tcm30-581246.pdf
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). UN Water (2021): *Progreso en la calidad de las aguas ambientales. Novedades sobre el indicador mundial 6.3.2 y necesidades de aceleración*. 64 pp.
- Rockström, J. *et al.* (2009): A safe operating space for humanity. *Nature*, vol. 461, pp 472–475.
- Sahuquillo, A. (1994): Protección, detección y control de la contaminación de acuíferos. *Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas*. AIH-GE. Alcalá de Henares. Tomo I, pp 25–36.
- San Román, J.; Delgado, F. y Gracia, J.M. (2015): Los nitratos en el agua subterránea: una contaminación que no remite. *Naturaleza Aragonesa* nº 32, pp 45–52.
- Sánchez, A. y Varela, M. (1981): La contaminación producida por los riegos en las aguas subterráneas de la Plana de Castellón. *Jornadas sobre análisis y evolución de la contaminación de aguas subterráneas en España*. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. Tomo I, pp 53–65.
- Sánchez, J.A.; San Román, J.; De Miguel, J.L. y Martínez, F.J. (1989): Distribución y evolución del contenido en nitratos en el acuífero aluvial del Bajo Gállego: primeros resultados. *VIII Conferencia sobre Hidrología General y Aplicada SMAGUA' 89*, pp. 117–125, Zaragoza.

- Sánchez, J.M.; Antigüedad, I.; Arrate, I.; Ruiz, M. y Morell, I. (1994): La zona no saturada y la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas en el acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (País Vasco). *Investigación en Zona No saturada*, 53–66. Ed. I. Morell.
- Sanchís, E. (1981): Los nitratos en los acuíferos costeros de Valencia. Su distribución en el espacio y en el tiempo. *Jornadas sobre análisis y evolución de la contaminación de aguas subterráneas en España*. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. Tomo I, pp 39–51.
- SARGA (2016). *Evaluación de la gestión y tecnologías de tratamiento de estiércol para la protección medioambiental y la sostenibilidad de la ganadería en Europa*. LIFE09 ENV/ES/000453 LIFE+MANEV. https://issuu.com/sargaslu/docs/lifemanev_es
- SODEMASA (2011). *Gestión medioambiental correcta y sostenible del purín porcino basada en tecnologías innovadoras: proyecto de demostración llevado a cabo en Aragón (España)*. LIFE06 ENV/E/000044-ES-WAMAR. https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3070
- Valladares, F., Cantera, X. y Escudero, A (2022): *La salud planetaria*. CSIC. Colección: ¿Qué sabemos de? CSIC. Madrid. 140 pp.

