

Vida científica

COLABORACIONES EN CIENCIAS DE LA NATURALEZA

EL AGUA, FUENTE DE VIDA Y DE PROBLEMAS



Fuente pública para el consumo.

Por todos es sabido que el agua es el origen de todos los procesos biológicos y ecológicos y es el elemento esencial para el desarrollo de la vida en el planeta. Desde la época antigua, se hacen referencias específicas al agua. Aristóteles define el agua como uno de los cuatro elementos básicos de la creación, junto con la tierra, el aire y el fuego. Nuestras vidas por completo dependen de ella, no es concebible ninguna actividad que no gire alrededor de este preciado líquido, ciudades, industrias, cultivos, etc.

En el planeta, el 97% es agua salada, el 2% se encuentra atrapada en capas de hielo y glaciares, por lo tanto, sólo el 1% restante puede ser utilizada por el ser humano. Actualmente existe en la Tierra la misma cantidad de agua que existía hace 3.800 millones de años atrás, época en la que se originó el agua de nuestro planeta. Gracias al denominado ciclo hidrológico por el que el agua cambia de estado —sólido, líquido y gaseoso—, esa misma cantidad primigenia de líquido circula desde entonces por todos los rincones de la Tierra. Es por esto que durante siglos se ha considerado el agua como un recurso ilimitado que, en consecuencia, no era preciso administrar cuidadosamente, pero en estos momentos, a principios del siglo XXI, mucha gente no

piensa lo mismo. Las demandas actuales de agua dulce son las mayores de la historia de la humanidad, y están en progresivo aumento. La necesidad de agua en el mundo ha crecido un 600% en los últimos 100 años, un crecimiento exponencial que se explica por el incremento de la población y el desarrollo industrial. El agua dulce comienza a resultar un bien escaso, que además sufre problemas de contaminaciones de todo tipo y deterioro del entorno natural, lo cual afecta a la vida y a la salud humanas.

La contaminación del agua es uno de los peores problemas ambientales que la naturaleza sufre hoy en día. La contaminación del agua no solo ocurre en los ríos o lagos, sino también en el océano. Desafortunadamente, muchos barcos han arrojado, accidentalmente, petróleo en el mar causando su contaminación y la muerte de muchos animales marinos. El hombre ha cambiado el color cristalino radiante de las aguas por borroso y en algún caso marrón.

La contaminación y *eutrofización* de los cuerpos acuáticos a causa de poluentes de origen humano originan serios problemas para el abastecimiento de agua potable en el mundo.

Durante los últimos veinte años, la palabra eutrofización ha sido utilizada cada vez más para designar el aporte artificial e indeseable de nutrientes tales como el fósforo, el nitrógeno y el carbono. Sin embargo, este concepto puede llevar a cierta confusión, ya que en algunos casos el ingreso de nutrientes a un lago o pantano puede resultar muy favorable, dependiendo del fin y el uso de las aguas del sistema en cuestión.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1982) define a la eutrofización como «el enriquecimiento en nutrientes de las aguas, que provoca la estimulación de una serie de cambios sintomáticos, entre los que el incremento en la producción de algas y macrófitas (especies vegetales superiores), el deterioro de la calidad de agua y otros cambios sintomáticos resultan indeseables e interfieren con la utilización del agua».

Etimológicamente, eutrofización viene del griego, se puede hacer referencia a que oligotrófico significa poco alimentado y eutrófico, bien alimentado.

La eutroficación es un problema mayor para las reservas de agua dulce y ocurre en primer lugar como resultado de nuestras actividades humanas en las cuencas. Algunos contaminantes sintéticos, como los detergentes de las aguas de lavado, y los escurrimientos de fertilizantes de las zonas agrícolas aledañas aumentan considerablemente el nivel de sustancias que sirven como nutrientes de las plantas acuáticas que flotan sobre las aguas; este aumento produce el crecimiento y proliferación masiva de ellas. Estas plantas acuáticas pueden formar entonces una gruesa capa sobre la superficie del estanque que tiene consecuencias catastróficas para el ecosistema.

Toda esta materia orgánica anormal incrementa el trabajo bacteriano en el agua. Como las bacterias consumen el oxígeno disuelto en el agua para vivir y la cantidad de bacterias vivas se dispara a niveles extremos, la cantidad de oxígeno en el agua se reduce drásticamente y no puede sostener la vida de los peces; en consecuencia, el ecosistema se destruye. El agua se vuelve mal oliente y desprovista de vida animal. En casos graves, persistentes, y en estanques de poca profundidad puede darse el caso de que las plantas acuáticas sequen y hagan desaparecer el propio estanque.

El fenómeno de eutroficación se da principalmente en aguas superficiales, en los grandes reservorios (lagos y lagunas), y últimamente en ríos que atraviesan ciudades. La eutroficación no puede ser ignorada, es un problema grave a resolver.

Si se habla, en general, de contaminación se puede afirmar que el origen de la contaminación de las aguas está ligado a alguna de estas cuatro actividades:

- Contaminación por actividades urbanas, consecuencia de la inadecuada eliminación y ubicación de los residuos, junto a las aguas residuales urbanas procedentes de usos domésticos (limpieza y cocina) y sanitarios, así como de la limpieza de calles.
- Contaminación de las aguas por prácticas agrícolas, debida fundamentalmente a la utilización de fertilizantes y biocidas en exceso.
- Contaminación de aguas por explotaciones ganaderas, debida a compuestos orgánicos y biológicos procedentes de residuos de instalaciones ganaderas y purines de animales estabulados.
- Contaminación del agua por actividades industriales, la cual es la más diversa, compleja y, en muchos casos, difícil de eliminar.

Los productos de cada una de estas fuentes de contaminación guardan cierta semejanza entre sí. Así por

ejemplo, la contaminación urbana se manifiesta por el aumento de la salinidad en el agua, adición de materia orgánica (que se puede manifestar como amonio, NH_4^+ , nitratos, NO_3^- y nitritos, NO_2^-) y posible contaminación biológica, mientras que la contaminación de origen agrícola se manifiesta por fuertes incrementos de compuestos nitrogenados, la presencia de organoclorados y otros compuestos orgánicos en las aguas.

Los procesos contaminantes, independientemente de su origen, se encuentran afectados, en cantidad e importancia, por las características del medio receptor, los usos del agua y calidades exigidas a la misma, aportes hídricos indirectos en relación a las características de la zona y otros factores que afecten a la dispersión de los contaminantes.

CONTAMINACIÓN POR COMPUESTOS NITROGENADOS

El nitrógeno en el agua puede tener principalmente dos orígenes:

- *Nitrógeno orgánico*: debido a contaminación orgánica, casi siempre de origen residual. Este nitrógeno se transforma sucesivamente en nitrógeno amoniacal, nitroso y nítrico, en función del tiempo y de la capacidad de oxidación del medio. En aguas muy contaminadas la evolución puede bloquearse en nitrito y en condiciones anaerobias, es decir, en ausencia de oxígeno, los nitratos pueden evolucionar en sentido contrario:

Nitratos → Nitritos → Amoniaco → Nitrógeno gaseoso (forma neutra)

- *Nitrógeno inorgánico*: la contaminación es debida principalmente al lavado de suelos ricos en nitratos como consecuencia de prácticas agrícolas. Esta contaminación en forma de nitratos suele ser bastante estable y difícilmente reversible.

En las aguas superficiales (ríos, lagos, embalses...) el nitrógeno puede encontrarse formando parte tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos. El consumo de compuestos nitrogenados como fertilizantes en las prácticas agrícolas es considerable, al igual que la aplicación en exceso de fertilizantes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) es una práctica normal, debido al desconocimiento del nivel de nutrientes en el suelo y a la idea de obtener un mejor cultivo.

Dado que la velocidad con la que se aportan estas sustancias es mayor que la velocidad con la que se degradan, se produce una contaminación del suelo, con el

consiguiente riesgo de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

La forma amoniacal se absorbe muy fuertemente por el suelo salvo en los calcáreos; en cambio, los nitratos son muy móviles y se disuelven fácilmente por lavado. El problema se complica con la nitrificación permanente del nitrógeno amoniacal, es decir, con su paso a nitrato y nitrito en función del tiempo.



Figura 1. Aplicación de purines en la agricultura.

Por lo tanto, el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados plantea una gran preocupación a distintos niveles debido a que su uso indiscriminado genera una repercusión económica, introduce impactos e indirectamente puede plantear problemas de salud pública ligados al consumo de agua.

En los *vertidos urbanos*, el nitrógeno tiene principalmente por origen la orina, que está compuesta por 25 gramos por litro (g/l) de urea, 0,6 g/l de ácido úrico, 1,5 g/l de creatina y 0,6 g/l de nitrógeno amoniacal. La mayor parte de estos compuestos dan muy rápidamente amoniaco por hidrólisis. En general, se admite que, en las aguas residuales urbanas, se eliminan 13 g de nitrógeno por habitante y día.

Los *desechos industriales* son también una fuente importante de nitrógeno, sobre todo los procedentes de instalaciones agrícolas, alimentarias e industrias químicas. Por lo que en función del grado de industrialización de la zona, la aportación de nitrógeno a las aguas, debida a los vertidos domésticos, industriales, agrícolas y ganaderos, será extremadamente variable.

La concentración de nitratos de origen natural en las aguas es, generalmente, de unos pocos mg/l. Sin embargo, se ha observado en numerosas ocasiones en las aguas subterráneas que esta concentración aumenta hasta varios centenares de mg/l, debido, de nuevo, a la intensificación de las prácticas agrícolas.

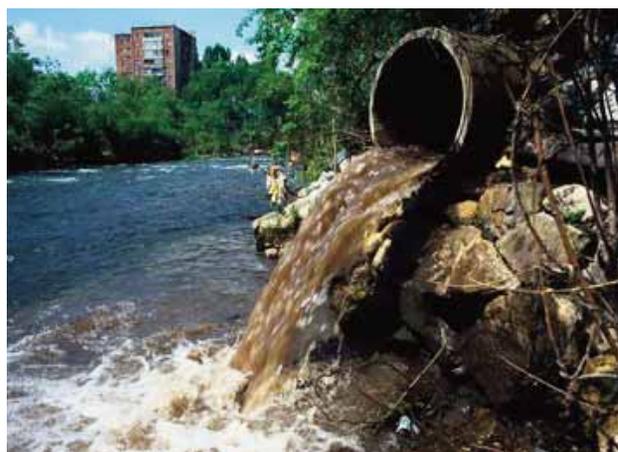


Figura 2. Vertidos.

Los nitratos en las aguas de pozos o fuentes no conectadas a redes municipales pueden también presentar concentraciones relativamente importantes. En este caso, los nitratos tienen habitualmente por origen una nitrificación del nitrógeno orgánico, pero también pueden proceder de la disolución de este elemento procedente de los terrenos atravesados. Se ha de señalar que muy a menudo estas aguas son de calidad mediocre o mala en lo que concierne a otros elementos.

El aumento de las concentraciones de nitratos en estos pozos y acuíferos también tiene la causa en determinadas prácticas agrícolas, ya que los agricultores vierten grandes cantidades de abonos nitrogenados en los campos para poder mantener una producción adecuada e incrementar las cosechas, la mayoría de los cuales no son absorbidos por las plantas ni por los árboles, sino que se depositan en el suelo y o bien van filtrándose hacia capas progresivamente más profundas hasta que se concentran en las capas freáticas, es decir, aquellas capas superficiales de los acuíferos que son susceptibles de ser explotadas mediante pozos, o bien por escorrentía llegan hasta las aguas superficiales.

Con la captación de este agua para el consumo a través de la red pública de abastecimiento, se completa el ciclo que permite pasar a los nitratos del medio natural al organismo humano.

CÓMO REDUCIR LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS

Hay dos modos de reducir la concentración de nitratos en los abastecimientos de agua potable. Mejorar las prácticas agrícolas (prevención) o reducir su concentración en los suministros de agua (remedio).

La eliminación de los compuestos nitrogenados de las aguas que ya han sido contaminadas es difícil: los iones amonio pueden convertirse en cloraminas, pero para ello se necesitan concentraciones de cloro diez veces mayores que las utilizadas normalmente en la desinfección, teniendo en cuenta que ni el dióxido de cloro ni el ozono actúan sobre estos compuestos. Podrían eliminarse también por nitrificación y aireación, para lo cual habría que prescindir de la precloración para no eliminar las bacterias implicadas en este tratamiento. Otra forma es por oxidación, los nitritos se oxidan fácilmente a nitratos en presencia de cloro u ozono. La eliminación de los nitratos se puede llevar a cabo de forma más compleja por desnitrificación biológica en condiciones de anaerobiosis, intercambio iónico e incluso osmosis inversa.

Entre los métodos de eliminar los nitratos de los suministros de agua se incluyen los siguientes:

- *Sustitución.* Reemplazar los suministros de alto contenido en nitratos por suministros de bajo contenido. En la práctica esta opción está normalmente restringida a pequeños y aislados recursos de aguas subterráneas contaminadas.
- *Mezclado.* Reducción de la concentración de nitratos mezclando el agua rica en nitratos con agua pobre en este compuesto. Para ello es necesario disponer de un suministro alternativo adecuado y de dispositivos para mezclar el agua en la proporción adecuada.
- *Almacenamiento.* Se puede conseguir alguna eliminación de nitratos almacenando el vertido durante largos periodos de tiempo en depósitos. El nitrato se reduce a nitrógeno gas por las bacterias en las condiciones de bajo nivel de oxígeno que existen en los sedimentos de los depósitos, un proceso conocido como desnitrificación.
- *Tratamiento.* Se pueden eliminar por intercambio iónico o desnitrificación microbiana. Ambos son caros y de operación en continuo.
- *Sustitución selectiva.* En vez de tratar la totalidad del suministro de agua, muchas compañías de aguas suministran un abastecimiento alternativo como agua embotellada o unidades de tratamiento domésticas.

EFFECTOS SOBRE LA SALUD

Desde hace tiempo, se ha puesto de manifiesto que el principal efecto perjudicial para la salud derivado de la ingestión de nitratos y nitritos es la metahemoglobinemia

(MHb), es decir, un incremento de metahemoglobina en la sangre, que es una hemoglobina (Hb) modificada (oxidada) incapaz de fijar el oxígeno y que provoca limitaciones de su transporte a los tejidos. La metahemoglobina se forma cuando en la Hb se oxida el Fe^{2+} a Fe^{3+} .

Cuando la metahemoglobinemia es elevada, la primera manifestación clínica es la cianosis, generalmente asociada a una tonalidad azulada de la piel, por lo que la enfermedad se la conoce como «enfermedad de los niños azules». Los síntomas son los siguientes: si la MHb es mayor del 10% de la Hb total, se producen dolores de cabeza, debilidad, taquicardias y falta de respiración. Si es mayor del 50%, da lugar a hipoxemia grave y a depresión del sistema nervioso central, y cuando es mayor del 70%, puede llegar a causar la muerte.



Figura 3. Enfermedad de los niños azules.

Por otro lado, se ha estudiado la posible asociación de la ingestión de nitratos con el cáncer debido a la formación de compuestos N-nitroso que son agentes teratogénicos, mutágenos y probables carcinógenos, altamente peligrosos para la salud humana. Los nitratos no son carcinogénicos para los animales de laboratorio. Parece ser que los nitritos tampoco lo son para ellos, pero pueden reaccionar con otros compuestos (aminas y amidas) y formar derivados N-nitrosos. Estas reacciones de nitrosación pueden producirse durante la maduración o el procesamiento de los alimentos, o en el mismo organismo (generalmente, en el estómago) a partir de los nitratos y nitritos absorbidos y presentes en la sangre.

En la valoración del riesgo de formación de nitrosaminas y nitrosamidas, se ha de tener en cuenta que a través de la dieta también se pueden ingerir inhibidores o potenciadores de las reacciones de nitrosación.

Entre el resto de la población, las personas que podrían sufrir efectos adversos son aquellas que presentan alteraciones que provocan un aumento de la formación

de nitritos, que tienen una hemoglobina anómala o que sufren deficiencias en el sistema enzimático encargado de transformar la metahemoglobina en hemoglobina. Entre estas personas están las mujeres embarazadas, las personas con hipoclorhidria gástrica natural o provocada por tratamientos antiácidos (úlceras pépticas, gastritis crónica), las personas con deficiencias hereditarias de metahemoglobina-reductasa o de NADH y las personas con hemoglobina anómala.

¿CUÁL ES EL NIVEL SEGURO DE NITRATOS Y NITRITOS EN EL AGUA DE CONSUMO?

Por lo que respecta a los efectos crónicos, en el año 1995, el JECFA (Join Expert Committee on Food Additives) (FAO- Food Agricultural Organization/WHO-OMS-World Health Organization-Organización Mundial de la Salud) establecieron la ingesta diaria admisible (IDA) de nitratos en 0-3,65 mg/kg de peso corporal y día y la ingesta diaria admisible de nitritos en 0-0,06 mg/kg.

Por lo tanto, para una persona de 60 kg la ingesta admisible de nitratos en el caso más desfavorable es de 219 mg al día. Esta IDA, establecida para los adultos, no se debe aplicar a los menores de tres meses de edad, porque la presencia de hemoglobina fetal en la sangre (más fácilmente oxidable a metahemoglobina), la acidez más baja de su estómago (que favorece la reducción de nitratos a nitritos) y las carencias en el sistema enzimático capaz de transformar la metahemoglobina en hemoglobina, los hacen más susceptibles de sufrir los efectos perjudiciales de la metahemoglobinemia.

Para prevenir los efectos agudos de la metahemoglobinemia en los neonatos, en el año 2004, la OMS confirmó un valor máximo orientativo de 50 mg/l de nitratos en el agua de consumo. Este valor fue establecido exclusivamente para prevenir la metahemoglobinemia, indicando que el grupo más vulnerable son los neonatos menores de tres meses alimentados con leche artificial.

La OMS indicó que disponía de amplia información epidemiológica que justificaba el valor recomendado. Por lo que respecta a los nitritos, la OMS aceptó para el nitrito y el nitrato una potencia relativa respecto a la formación de metahemoglobina de 10:1 (en términos molares) y propuso para los nitritos un valor guía provisional de 3 mg/l en relación con los efectos agudos.

Respecto a los posibles efectos a largo plazo, la OMS propuso un valor guía de 0,2 mg/l de nitritos. Sin embargo, como los nitratos y los nitritos pueden estar presentes

al mismo tiempo en el agua de bebida, la OMS indicó que la suma de las relaciones entre la concentración y el valor guía de los dos parámetros (50 mg/l para los nitratos y 3 mg/l para los nitritos) no debería de superar la unidad:

$$\frac{[\text{nitratos}]}{50} + \frac{[\text{nitritos}]}{50} \leq 1$$

En la Directiva comunitaria que regula la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, los valores máximos admitidos son 50 mg/l de nitratos y 0,5 mg/l de nitritos. En España, la norma que traspone la citada directiva (RD 140/2003) también establece un valor paramétrico de 50 mg/l de nitratos. En cambio, para los nitritos es mucho más rigurosa en la concentración máxima a la salida del tratamiento (0,1 mg/l) mientras que mantiene los 0,5 mg/l en el agua de la red de distribución.

VIGILANCIA SANITARIA

Las autoridades sanitarias deberán realizar una serie de actuaciones a fin de evitar riesgos para la Salud Pública derivados del mal uso y/o abuso de los compuestos nitrogenados que pueden encontrarse posteriormente en aguas de consumo, alimentos, etc.

Con respecto al *agua de consumo público*, la vigilancia corresponde a la autoridad sanitaria, que velará para que se realicen las inspecciones periódicas del abastecimiento, debiendo cumplir los criterios sanitarios de calidad establecidos en el RD 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua del consumo humano.

Estos criterios se aplican a todas aquellas aguas que, independientemente de su origen y del tratamiento de potabilización que reciban, se utilicen en la industria alimentaria o se suministren a través de redes de distribución pública o privada, depósitos o cisternas.

Se fijan parámetros y valores paramétricos a cumplir en el punto donde se pone el agua de consumo humano a disposición del consumidor. Estos valores se basan principalmente en las recomendaciones de la OMS y en motivos de salud pública aplicándose, en algunos casos, el principio de precaución para asegurar un alto nivel de protección de la salud de la población.

Los valores paramétricos establecidos para nitratos y nitritos en el agua y en la salida del depósito de la red de distribución son los mencionados anteriormente.

La concentración de nitritos se determinará cuando se utilice la cloraminación como método de desinfección.



Figura 4. Riego por aspersión.

En cuanto al tratamiento de las *aguas residuales urbanas* la vigilancia se centra en el cumplimiento del RD-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las *Normas Aplicables al Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas*, y del RD 509/1996, de 15 de marzo, que lo desarrolla.

Se impone a determinadas aglomeraciones urbanas la obligación de disponer de sistemas colectores para la recogida y conducción de las aguas residuales, y de aplicar a éstas distintos tratamientos antes de su vertido a las aguas continentales o marítimas. En la determinación de estos tratamientos se tiene en cuenta si los vertidos se efectúan en *zonas sensibles* o en *zonas menos sensibles*, lo que determinará un tratamiento más o menos riguroso.

Se considerará que un medio acuático es *zona sensible* si puede incluirse en uno de los siguientes grupos:

- Lagos, lagunas, embalses, estuarios y aguas marítimas que sean eutróficos o que podrían llegar a ser eutróficos en un futuro próximo si no se adoptan medidas de protección.
- Lagos y cursos de agua que desemboquen en lagos, lagunas, embalses, bahías cerradas que tengan un intercambio de aguas escaso y en los que, por lo tanto, puede producirse una acumulación. En dichas zonas conviene prever la eliminación de fósforo a no ser que se demuestre que dicha eliminación no tendrá consecuencias sobre el nivel de eutrofización. También podrá considerarse la eliminación de nitrógeno cuando se realicen vertidos de grandes aglomeraciones urbanas.
- Estuarios, bahías y otras aguas marítimas que tengan un intercambio de aguas escaso o que reciban gran cantidad de nutrientes. Los vertidos de aglomeraciones pequeñas tienen normalmente poca importancia en dichas zonas, pero para las

grandes aglomeraciones deberá incluirse la eliminación de fósforo y/o nitrógeno a menos que se demuestre que su eliminación no tendrá consecuencias sobre el nivel de eutrofización.

- Aguas continentales superficiales destinadas a la obtención de agua potable que podrían contener una concentración de nitratos superior a la que establecen las disposiciones pertinentes del RD 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el *Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica*.
- Masas de agua en las que sea necesario un tratamiento adicional al tratamiento secundario.

Un medio o zona de agua marina podrá catalogarse como *zona menos sensible* cuando el vertido de aguas residuales no tenga efectos negativos sobre el medio ambiente debido a la morfología, hidrología o condiciones hidráulicas específicas existentes en esta zona.

Al determinar las zonas menos sensibles, se tomará en consideración el riesgo de que la carga vertida pueda desplazarse a zonas adyacentes y ser perjudicial para el medio ambiente. Para determinar las zonas menos sensibles se tendrán en cuenta los siguientes elementos: Bahías abiertas, estuarios y otras aguas marítimas con un intercambio de agua bueno y que no tengan eutrofización o agotamiento del oxígeno, o en las que se considere que es improbable que lleguen a desarrollarse fenómenos de eutrofización o de agotamiento del oxígeno por el vertido de aguas residuales urbanas. La declaración de dichas zonas se revisará al menos cada cuatro años.

En los Reales Decretos antes mencionados quedan fijados los requisitos técnicos que deberán cumplir los sistemas colectores y las instalaciones de tratamiento de las aguas residuales, los requisitos de los vertidos procedentes de instalaciones secundarias o de aquellos que vayan a realizarse en zonas sensibles y regula el tratamiento previo de los vertidos de las aguas residuales industriales cuando éstos se realicen a sistemas colectores o a instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas.

Las Administraciones públicas, en el ámbito de sus respectivas competencias, deberán efectuar el seguimiento y los controles precisos para garantizar el cumplimiento de las obligaciones contempladas en las citadas normativas, fijando los métodos de referencia para el seguimiento y evaluación de los resultados de dichos controles.

Pilar Fernández Hernando
Dpto. de Ciencias Analíticas