

# Fitodepuración en humedales.

## Conceptos generales

María Dolores Curt Fernández de la Mora



### 1. FITODEPURACIÓN Y HUMEDALES

Por fitodepuración (*phyto* = planta, *depurare* = limpiar, purificar) se entiende la reducción o eliminación de contaminantes de las aguas residuales, por medio de una serie de complejos procesos biológicos y fisicoquímicos en los que participan las plantas del propio ecosistema acuático. La fitodepuración ocurre naturalmente en los ecosistemas que reciben aguas contaminadas y, junto a la denominada autodepuración de las aguas, ha sido el procedimiento clásico de recuperación de la calidad del agua. Este proceso ocurre tanto en humedales naturales como en humedales artificiales creados por el hombre.

Desde un punto de vista estricto, el concepto de fitodepuración puede aplicarse cuando existe la intervención de cualquier tipo de organismo fotosintético, ya sean plantas superiores (macrofitas) como algas macroscópicas o microscópicas. Sin embargo, el concepto más generalizado del término fitodepuración lleva actualmente implícito la intervención de macrofitas. Los procedimientos de tratamiento de aguas por lagunaje —en los que hay intervención de microalgas— no serían por tanto objeto de la fitodepuración. La fitodepuración, por tanto, se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrofitas) en los denominados humedales o sistemas acuáticos, ya sean naturales o artificiales.

Los humedales naturales pueden definirse como aquellos lugares terrestres que permane-

cen inundados o saturados de agua durante, al menos, un tiempo lo suficientemente prolongado como para que se desarrolle en ellos un tipo de vegetación característica, palustre, que está adaptada a esas condiciones de inundación o saturación de agua, como por ejemplo, los carrizales, espadañales, juncales o los masiegales. Son sistemas de transición entre los ambientes terrestres y los acuáticos, por lo que sus límites suelen ser difusos y su morfología variable con el tiempo, mostrando ciclos temporales más o menos acusados y un extraordinario dinamismo. Los humedales se reconocen fácilmente por un conjunto de características generales, como son la presencia de una lámina de agua poco profunda o de una capa freática en superficie sobre suelos hidromorfos, y la existencia de una vegetación especializada, ya sean plantas que viven en el agua (hidrofitos) o las que se desarrollan en terrenos permanentemente inundados o al menos saturados de agua, con bastante frecuencia (higrofitos). Uno de los rasgos más característicos de la vegetación de los humedales es su adaptación a vivir con una fuerte limitación de la disponibilidad del oxígeno en el suelo, es decir, en condiciones de anaerobiosis que normalmente no soportan las plantas terrestres.

Desde el punto de vista ecológico, los humedales naturales son lugares de extraordinario valor. Su protección está reconocida a nivel nacional e internacional, siendo el hito más significativo el denominado Convenio de Ramsar, surgido a raíz de la Conferencia Internacional sobre la Conservación de las Zonas Húmedas y de las Aves acuáticas celebrada en Ramsar (Irán) en 1971. Los humedales

naturales más importantes de España, son los parques nacionales de Doñana, creado en 1969, y las Tablas de Daimiel, de 1973, ambos incluidos en la Lista Ramsar. Otras áreas húmedas de gran interés ecológico son las lagunas de Ruidera, las lagunas salinas de la Mancha, las Marismas del Guadalquivir y el Delta del Ebro.

Parque  
Nacional  
de las Tablas  
de Daimiel  
© M.D. Curt



La importancia de los humedales naturales radica tanto en sus peculiaridades biológicas –vegetación y fauna especializada– como en las funciones que desempeñan en el ciclo del agua y de la materia orgánica, reciclado de nutrientes, mantenimiento de redes tróficas y estabilización de sedimentos. Tienen un importante papel como ‘depuradoras’ naturales, contribuyendo al mantenimiento de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales. A este respecto es importante destacar que del estudio de su dinámica y actuación se derivan los denominados sistemas blandos de depuración de aguas residuales (lagunaje y humedales artificiales), que en definitiva son sistemas desarrollados por el hombre en los que se imita la dinámica depuradora de los humedales naturales, pero con una mayor velocidad que la que se produce en los humedales naturales. Es preciso señalar que el aprovechamiento de humedales naturales para el tratamiento de aguas residuales está totalmente desaconsejado, ya que supone un grave impacto medioambiental y la posibilidad de contaminar los acuíferos y ecosistemas circundantes. Solamente si el aporte de agua residual está controlado dentro de los límites de depuración total que puede ofrecer el humedal, podría ser tolerada esta aplicación.

Los humedales artificiales son los que han sido construidos por el hombre para el tratamiento de aguas residuales. Consisten en estanques o canales de poca profundidad (normal-

mente <1m) en los que se implantan especies vegetales adaptadas a la vida acuática y en los que la depuración se basa en procesos naturales de tipo microbiológico, biológico, físico y químico. Su diseño es muy variado, pero siempre incluye canalizaciones, aislamiento del suelo para evitar el paso de la contaminación a los ecosistemas naturales circundantes y el control del flujo del efluente en cuanto a su dirección, flujo, tiempo de retención, y nivel del agua.

En relación con otros sistemas de depuración tecnológicos, los humedales artificiales tienen las ventajas de bajo coste, mantenimiento sencillo, eficaz capacidad depuradora de aguas residuales con contaminación principalmente orgánica, y bajo impacto visual de las instalaciones, porque la vegetación proporciona una apariencia natural. Entre sus limitaciones se pueden indicar que requieren amplias superficies de terreno y que no son apropiados para determinadas aplicaciones, como por ejemplo el tratamiento de aguas industriales con alta contaminación inorgánica. Los humedales artificiales son especialmente apropiados para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas poblaciones, en donde se suelen dar las circunstancias de bajo coste del terreno y mano de obra no altamente tecnificada.

## 2. PLANTAS PROPIAS DE LOS HUMEDALES

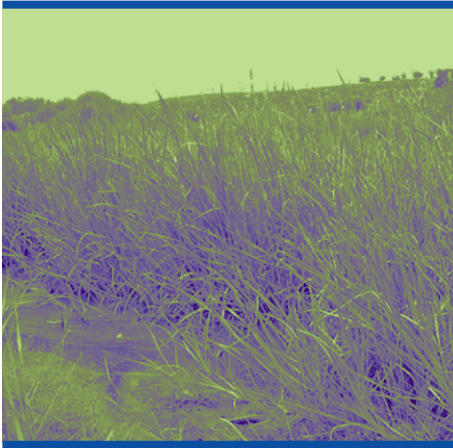
### 2.1. Concepto de macrofitas

El rasgo que mejor define a los vegetales es el hecho de que son seres vivos fotosintéticos –exceptuando plantas parásitas–, por lo que su nutrición es de tipo autótrofo. La fotosíntesis les confiere la capacidad de utilizar como fuente de carbono un compuesto inorgánico, el dióxido de carbono, para desarrollarse y así generar materia orgánica; es lo que conforma la denominada producción primaria en el planeta. En el curso de la evolución, ha sucedido el desarrollo progresivo de los vegetales desde organismos muy elementales (algas unicelulares procarióticas) a organismos muy evolucionados (plantas superiores) que incorporan mecanismos sofisticados de adaptación al ambiente terrestre. En función del tipo de organización y nivel de desa-

rollo alcanzado, se distinguen dos grandes grupos de organismos fotosintéticos: algas (unicelulares o pluricelulares), que son organismos fotosintéticos inferiores, y embriofitos, que comprenden musgos (briofitos), helechos (pteridofitos) y plantas con semilla (espermatofitos, también denominadas plantas superiores). En los humedales naturales se pueden encontrar todos estos tipos de organismos, dando lugar a comunidades de gran biodiversidad.

Desde el punto de vista botánico, el término 'macrofitas' se aplica a cualquier vegetal que es visible a simple vista (herbáceas, arbustos, árboles), en oposición al término 'microfitas', utilizado genéricamente para vegetales que no son visibles sin la ayuda de lentes ópticas (algas microscópicas). Por ello, los vegetales de talla visible que crecen en los humedales se denominan 'macrofitas acuáticas', término que desde un punto de vista amplio englobaría plantas acuáticas vasculares (angiospermas y helechos), musgos acuáticos y grandes algas.

*Colonia de macrofitas (Typha spp.) desarrollada sobre un cauce contaminado por efluentes municipales sin tratar*  
© M.D. Curt



En el área de investigación sobre humedales, ya sean naturales o artificiales, se utiliza la denominación 'macrofitas' de manera no estrictamente coincidente con el concepto botánico. Así pues, el término 'macrofitas' ha llegado ya a incluir el concepto de que se trata de planta acuática entre los miembros de la comunidad científica, por lo que así se utilizará este término en lo sucesivo. También hay que señalar que, debido a que los vegetales que predominan en los humedales son angiospermas (=plantas con semilla), a menudo se aplica el término 'macrofi-

tas' de modo restrictivo, esto es, para referirse únicamente a las plantas acuáticas con semilla.

## 2.2. Tipos de plantas en los humedales

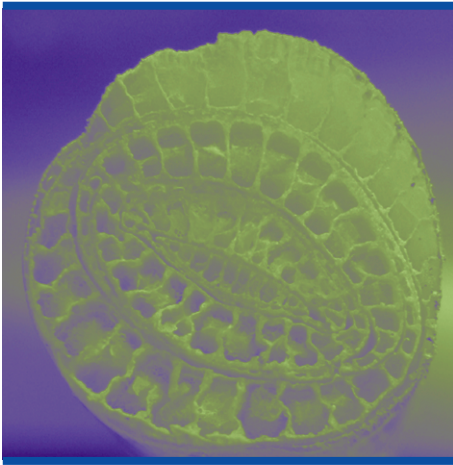
En los humedales naturales coexisten áreas inundadas, en las que se mantiene una capa de agua más o menos constante (unos centímetros a 1 m de profundidad) con áreas permanentemente saturadas de agua, que suponen una transición entre el área inundada y las zonas terrestres circundantes al humedal. Las plantas que naturalmente se desarrollan en el humedal se pueden localizar en cualquiera de esas áreas, ya sea la acuática o la de saturación de agua. Las peculiaridades ambientales determinan que las plantas que allí viven hayan desarrollado adaptaciones específicas a las condiciones de humedad.

En función del grado de adaptación que muestren las macrofitas de los humedales, se distinguen dos grandes grupos: por una parte los hidrófitos, que son plantas acuáticas en sentido estricto, y por otra, los higrófitos terrestres, que son aquellas plantas de suelos más o menos permanentemente saturados en agua.

### 2.2.1. Plantas acuáticas estrictas: hidrófitos

Se denominan hidrófitos a las plantas que viven en el agua, que muestran un grado de adaptación muy avanzado a las condiciones de vida acuática. A diferencia de los hidrófitos, las plantas terrestres están arraigadas en suelos más o menos aireados en los que circula la denominada 'atmósfera del suelo', cuya composición es próxima a la del aire. Los gases más importantes para la fisiología de las plantas son el oxígeno y el dióxido de carbono, que están en una proporción aproximada de 210 cm<sup>3</sup> y 0.3 cm<sup>3</sup> por litro de aire, respectivamente. En los medios acuáticos la proporción de oxígeno es muy diferente, pero la proporción de dióxido de carbono suele ser bastante parecida a la de la atmósfera del suelo. El contenido máximo de oxígeno disuelto en el agua (agua saturada de aire) es del orden de 6.4 cm<sup>3</sup> por litro (a 20°C), pero en las aguas de los humedales el oxígeno disuelto es menor; y su proporción es un índice del grado de contaminación del agua (menos oxígeno cuanto más contaminada).

Corte de la base de un tallo de *Typha* spp., en el que puede observarse una amplia red de canales aeríferos  
© M.D. Curt



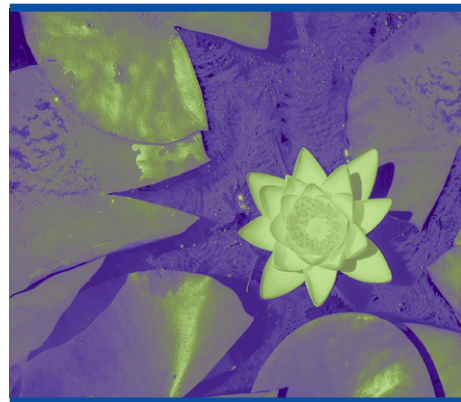
Así pues, como consecuencia de las características medioambientales, las plantas acuáticas han tenido que desarrollar mecanismos de adaptación a un medio con amplia disponibilidad hídrica pero pobre en oxígeno. A diferencia de las plantas terrestres, las plantas acuáticas muestran epidermis muy delgadas, a fin de reducir la resistencia al paso de gases, agua y nutrientes, y tejidos con un gran desarrollo de los espacios intercelulares que dá lugar a una red de conductos huecos en los que se almacena y circula aire con oxígeno. Esta red de canales facilita la difusión de gases entre los distintos órganos de la planta, y cuando la planta tiene parte de sus órganos por encima de la lámina del agua, permite la transferencia de oxígeno desde el aire y órganos fotosintéticos, hacia las raíces, y de allí hacia la rizosfera, actuando como mecanismo oxigenador del agua del humedal.

También se dan otras muchas adaptaciones al medio acuático, que conviene señalar. Algunas especies acuáticas prescinden del sistema radicular (por ejemplo, *Ceratophyllum* spp.) por lo que su aspecto recuerda a las algas. Otras desarrollan heterofilia, que consiste en la diferenciación morfológica entre hojas sumergidas y hojas emergidas (por ejemplo, *Ranunculus aquatilis*); en estos casos las hojas sumergidas suelen ser delgadas y filiformes.

Las plantas acuáticas muestran una gran diversidad en cuanto a modo de vida. En función de dónde se sitúan los órganos asimiladores, se distinguen tres tipos de plantas acuáticas: sumergidas, anfibas y flotantes.

- Plantas acuáticas sumergidas: Son aquellas que se desarrollan en la columna de agua, manteniendo todos sus órganos vegetativos por debajo de la lámina de agua. Son plantas muy interesantes en los humedales naturales a causa de su efecto oxigenador en la columna de agua; al estar los órganos asimiladores sumergidos, el oxígeno liberado por fotosíntesis pasa directamente al agua. En este grupo se encuadran especies muy comunes de los humedales naturales, como *Ranunculus aquatilis* (ranúnculo de agua) y *Potamogeton* spp., y otras que se utilizan frecuentemente en estanques ornamentales por su capacidad oxigenadora, como son *Ceratophyllum demersum* o *Myriophyllum verticillatum*. Algunas especies sumergidas emergen sólo para florecer; como por ejemplo *Lobelia dortmanna* (lobelia de agua).

Algunas de las plantas acuáticas sumergidas de aplicación en sistemas acuáticos artificiales de depuración son *Potamogeton* spp. y *Elodea* spp. Se utilizan para oxigenar el agua en profundidad y para proporcionar soporte para la flora microbiana.

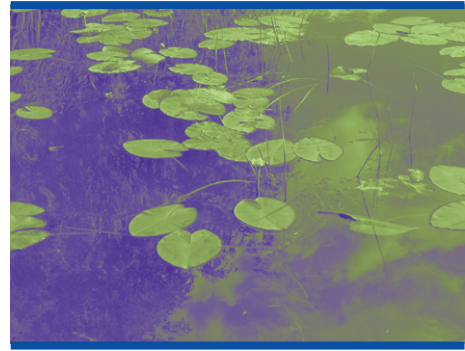


Estanque de nenúfares. A través del agua se observa un entramado de *Ceratophyllum demersum*, acuática sumergida utilizada para oxigenar el medio  
© M.D. Curt

- Plantas anfibas (emergentes): Son aquellas plantas que tienen parte de su estructura vegetativa dentro del agua, y otra parte fuera de ésta, como por ejemplo, el *Polygonum amphibium*. Típicamente se trata de plantas arraigadas en el suelo sumergido (fango) o suelo encharcado, y que asoman parte de su cuerpo vegetativo por encima de la lámina del agua. Las plantas anfibas también reciben la denominación de helófitas, término derivado del griego, *helo-*, que quiere decir pantano. En este grupo se encuen-

tran importantes especies de interés en los humedales artificiales, como las eneas *Typha domingensis*, *T. angustifolia*, *T. latifolia*, la caña común *Phragmites australis* y el esparganio, *Sparganium erectum*. La función primaria de los helofitos en los humedales artificiales es la de actuar de filtro para mejorar los procesos de floculación y sedimentación. Otras funciones son la de servir de soporte de microorganismos –por desarrollo de una gran superficie de órganos sumergidos–, oxigenar el agua circundante en la rizosfera, extraer nutrientes –que redundará en la disminución de la carga contaminante–, sombreadar el agua –que evita el crecimiento de las algas–, actuar de barrera cortaviento –que facilita la estabilización del agua– y aislar térmicamente el agua.

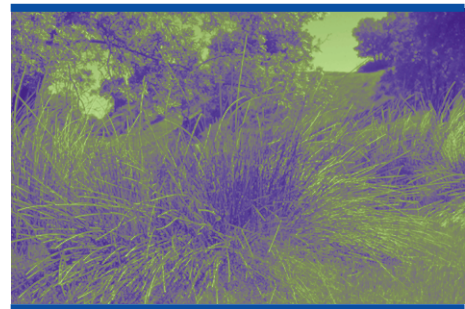
en algunas circunstancias estas especies pueden llegar a ser invasivas, perjudicando el funcionamiento del humedal cuando están en grandes colonias, por limitar la difusión de oxígeno desde la atmósfera, y bloquear el paso de la luz para las plantas sumergidas.



*Acuática flotante*  
*Nuphar luteum*  
*en un humedal natural*  
© M.D. Curt

### 2.2.2. Higrófitos terrestres

Se denominan higrófitos a aquellas plantas que viven en ambientes húmedos. Los higrófitos terrestres, se desarrollan sobre suelos saturados de agua. Son plantas que, sin ser acuáticas, muestran un cierto grado de adaptación morfológica y fisiológica a las condiciones de saturación de agua en el suelo o sustrato en el que se desarrolla el sistema radicular. Pueden soportar condiciones de humedad inferior a saturación por espacios de tiempo no prolongados, pero no sobreviven en ambientes secos.



*Juncos de bolas* (*Scirpus holoschoenus*)  
*en una fresneda natural,*  
*indicando una zona con*  
*humedad permanente*  
© M.D. Curt

Algunas de estas especies, además de vivir en sustratos permanentemente húmedos, son tolerantes a la contaminación del agua, y por ello pueden emplearse en los humedales artificiales. Algunas especies corrientemente utilizadas en humedales artificiales son higrófitos, como los

*Humedal natural.*  
*En primer término,*  
*colonia de helofitas.*  
*Al fondo,*  
*bosquete de tarayes*  
© M.D. Curt



- **Plantas flotantes:** Son plantas en las que sus órganos asimiladores están flotando en la superficie del agua. Este grupo comprende plantas de libre flotación, que son aquellas que presentan raíces suspendidas en el agua (por ejemplo, la lenteja de agua), como plantas flotantes enraizadas, que son aquellas en las que sus raíces están ancladas en el fango del humedal, pero sus hojas están flotando en la lámina de agua (por ejemplo, los nenúfares).

Entre las plantas flotantes de aplicación a los sistemas acuáticos de tratamiento de aguas, hay que mencionar la lenteja de agua (*Lemna minor*), que tiene muy pequeño tamaño, pero es muy prolífica por multiplicarse vegetativamente, y el jacinto de agua, (*Eichhornia crassipes*), de muy alta productividad. La función principal de estas plantas es la de proporcionar sombreado para dificultar el crecimiento de las algas, además de actuar extrayendo nutrientes. Sin embargo,

juncos (*Scirpus holoschoenus* y otros *Scirpus*). Su principal función es la de contribuir a los procesos físicos de separación del agua, actuando a modo de filtro.

### 3. LOS HUMEDALES ARTIFICIALES COMO ECOSISTEMAS

Los humedales artificiales reproducen la dinámica de los humedales naturales, y como éstos, constituyen delicados ecosistemas, que combinan procesos físicos, químicos y biológicos en un medio diseñado, construido y manejado por el hombre. La principal diferencia con respecto a los humedales naturales, es el grado de control que puede ejercerse sobre los procesos intervinientes. Algunos de los aspectos diferenciales con respecto a los humedales naturales, son el hecho de que el flujo de agua es más estable —no está sometido necesariamente a fluctuaciones estacionales—, el tiempo de retención está controlado por el operador, y la carga contaminante es más elevada. Sin embargo, y a semejanza de lo que ocurre en los humedales naturales la influencia de los parámetros climáticos (precipitación, radiación, temperatura) en el comportamiento del humedal es importante. Las temperaturas bajas hacen que se retarden los procesos biológicos, pero en cambio no afectan a procesos físicos como la filtración y sedimentación.

El comportamiento de los humedales artificiales es el resultado de un entramado complejo de procesos físicos, químicos y biológicos, siendo de extrema importancia la actuación e interacciones con el agua residual, de los componentes vivos del sistema: microorganismos, hongos, algas, vegetación (plantas superiores) y fauna.

#### 3.1. Microorganismos y organismos inferiores heterótrofos

En este apartado se incluyen pequeños organismos heterótrofos que tienen cometidos indispensables para la depuración del agua residual, como bacterias, protozoos, actinomicetes, hongos. Aunque son grupos de organismos muy diferentes, coinciden en la doble vertiente de

ser organismos que participan en la descomposición de materia orgánica y a la vez, productores primarios de biomasa. Son organismos heterótrofos, es decir, organismos que necesariamente requieren carbono orgánico para desarrollarse —en oposición a los organismos fotosintéticos, algas y plantas, cuya fuente de carbono es inorgánica—. Se desarrollan naturalmente en los humedales artificiales, concentrándose alrededor de la superficie de partículas sólidas, sedimentos, y de desechos y partes sumergidas de las plantas.

Las bacterias intervienen en procesos esenciales para el buen comportamiento del sistema. Así pues, son responsables de la degradación de la materia orgánica y de la remoción de la contaminación orgánica por intervenir en la liberación de compuestos gaseosos del carbono hacia la atmósfera (anhídrido carbónico, metano). También desempeñan una función esencial en el ciclo del nitrógeno, ya que hidrolizan el nitrógeno orgánico y lo transforman hacia formas asimilables para las plantas (ion amonio y nitrato); además, la actividad de ciertas bacterias anaerobias conduce a la desnitrificación, que consiste en la reducción del ion nitrato a nitrógeno gaseoso, que se libera hacia la atmósfera. La disponibilidad del fósforo para las plantas, que es otro elemento esencial para su nutrición, también depende en cierta medida de la actividad microbiana, al transformar formas insolubles de fósforo a formas solubles fácilmente asimilables por las plantas. Otros procesos en los que participan bacterias son la reducción de compuestos de azufre a sulfuros y la oxidación de sulfuros.

Los protozoos son muy abundantes en las aguas residuales de tipo orgánico. Su papel en el tratamiento de las aguas residuales domésticas es bien conocido, y se aprovecha para el buen funcionamiento de sistemas de tratamiento convencionales (fangos activados, filtros de percolación lenta). Son importantes organismos en la cadena trófica del sistema, ya que al alimentarse de bacterias, regulan la población bacteriana responsable de la descomposición de la materia orgánica. Otros aspectos a destacar son su contribución a flocular sólidos orgánicos en suspensión del agua residual y la excreción, como productos de su metabolismo, de ortofosfatos y amonio, compuestos inorgánicos de

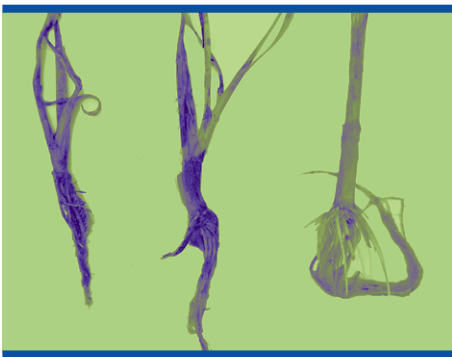
fósforo y nitrógeno, respectivamente, fácilmente asimilables por las plantas.

Con carácter general los hongos son organismos descomponedores de la materia orgánica. Los hongos que se encuentran en los humedales (actinomicetes y otros) son mayoritariamente organismos saprofiticos que se nutren de restos de organismos –restos de alimentos, residuos de plantas...–, contribuyendo, por tanto, a reducir la carga orgánica contaminante del sistema.

### 3.2. Algas

Las algas son organismos acuáticos fotosintéticos cuyo papel es esencial en la biosfera; así pues, se estima que las algas contribuyen con alrededor de un 90% a la fotosíntesis de la Tierra. La presencia de algas en los humedales es inherente a su condición de hábitats húmedos. Las algas, al realizar la función fotosintética, contribuyen a crear ambiente aerobio liberando oxígeno propicio para procesos oxidativos de la carga contaminante.

*Sistema radicular de Typha spp. afectado por la proliferación de algas. Sentido de la afección mayor de derecha a izquierda*  
© M.D. Curt



Sin embargo, la proliferación incontrolada de algas, que puede ocurrir cuando en el medio hay un exceso de nitratos y fosfatos (eutrofización), no es deseable, porque puede ocasionar efectos perniciosos en el sistema. Entre otros efectos, caben señalar el aumento de los sólidos en suspensión, turbidez, bloqueo del paso de la luz a través de la columna de agua, competencia por nutrientes con plantas superiores acuáticas y afección a las raicillas de la vegetación del humedal.

### 3.3. Vegetación

El papel de la vegetación en la eficacia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales con macrofitas ha sido ampliamente debatido en el ámbito científico. Es indudable que la vegetación en los humedales artificiales es un componente fundamental del sistema, ya que el sistema de tratamiento está estrechamente relacionado con un tipo determinado de vegetación. Por ejemplo, no pueden desarrollarse sistemas acuáticos si no se dispone de plantas flotantes.

La vegetación desempeña papeles múltiples en el buen funcionamiento del sistema. Se trata tanto de actuaciones activas derivadas de la actividad fisiológica de la vegetación como actuaciones pasivas, en las que no intervienen éstos, sino procesos físicos por efecto de la presencia de las plantas en el sistema.

#### 3.3.1. Actuación pasiva de la vegetación en la depuración

En el balance global de las funciones que desempeña la vegetación en los humedales artificiales, los procesos físicos suponen la función más importante de las plantas para la eficacia depuradora del sistema.

En primer lugar las macrofitas pueden ejercer funciones de desbaste, reteniendo los sólidos gruesos arrastrados por el agua residual. También, por actuar de barrera física para el flujo del agua residual, reducen la velocidad del influente, lo que favorece la floculación la sedimentación de partículas en suspensión.

Por otra parte, las partes de las plantas que están en contacto con el influente, actúan como soporte pasivo de microorganismos y crean en sus proximidades ambientes propicios para el desarrollo de estos; es decir, las plantas crean una enorme área superficial para el desarrollo de 'bio-películas', en las que crecen bacterias, protozoos, y algas microscópicas.

También son de reseñar las actuaciones pasivas que se refieren a la parte aérea de las plantas. Cuando la vegetación tiene un determinado porte, como ocurre con plantas acuáticas

emergentes, la vegetación tiene un cierto efecto amortiguador de las temperaturas extremas y otros fenómenos atmosféricos, ya que aísla la superficie del agua, intercepta lluvia y nieve, y reduce las pérdidas de calor que eventualmente se producen por el viento.

Reducción de la velocidad del influente y retención de materia orgánica por una colonia de *Typha* spp.  
© M.D. Curt



### 3.3.2. Procesos activos de la vegetación en la depuración

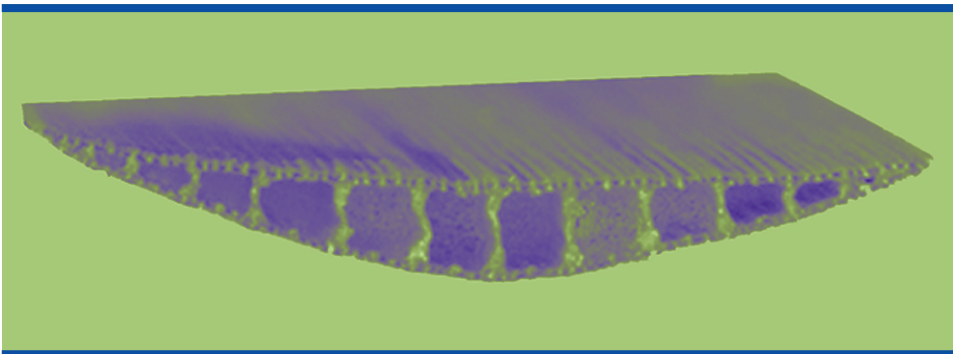
Con respecto a las funciones que desempeñan activamente las plantas en los humedales artificiales, hay que destacar: el intercambio gaseoso hacia desde las hojas hacia la zona radicular en contacto con el agua residual, y la extracción de contaminantes del agua. Las plantas adaptadas a vivir en aguas con elevada carga orgánica, utilizando su propia energía procedente en última instancia de la energía solar captada por fotosíntesis, son capaces de enviar el oxígeno del aire

raíces por medio de los microorganismos que viven asociados al sistema radicular de la planta. También las macrofitas pueden ejercer una depuración directa por la absorción de iones contaminantes, tanto metales pesados como aniones eutrofizantes (nitratos y fosfatos principalmente).

#### ● Oxigenación del medio

Como ya se ha indicado, las plantas acuáticas, y particularmente, las macrofitas emergentes, han desarrollado mecanismos adaptativos a las condiciones de saturación del sustrato y de inundación. Entre estas adaptaciones hay que destacar las que se refieren a necesidad de proporcionar mecanismos de aireación de sus tejidos. La presencia de lenticelas, pequeñas aberturas en hojas y tallos, permite que el aire entre dentro de la planta, pero lo que es más importante es el desarrollo de un tejido especializado con grandes espacios huecos interconectados, el aerénquima, que permite la convección de gases a través de toda la longitud de la planta, llegando a proporcionar aire a las raíces. Finalmente, por intercambio gaseoso en las raíces se libera oxígeno al medio, redundando en la creación de un microambiente aerobio en el agua próxima a las raíces. Este microambiente estimula el desarrollo de microorganismos aerobios responsables de la degradación de la materia orgánica, resultando en la disminución de la carga contaminante del sistema. La magnitud del efecto oxigenador de las macrofitas acuáticas ha sido muy

Corte transversal de una hoja de *Typha* spp., en el que pueden observarse canales aeríferos que permiten la circulación de oxígeno hacia el sistema radicular  
© M.D. Curt



hasta sus raíces a través de un sistema conductor muy especializado. Esto favorece la degradación de la materia orgánica del entorno de las

debatido en la comunidad científica, entre otras razones por las dificultades experimentales y por la incertidumbre de la extrapolación. Por



ejemplo, se indica que *Phragmites* puede liberar hasta 4.3 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/día y las plantas flotantes de 0.25 a 9.6 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/día.

- Extracción de nutrientes

El papel que desempeña la vegetación en la remoción de nutrientes y otros contaminantes del agua está estrictamente relacionado con factores intrínsecos de la planta. Obviamente, las extracciones en valores absolutos (g extraídos del elemento por unidad de superficie vegetada) dependerán del rendimiento de la planta (g de peso seco de biomasa producida por unidad de superficie) y del contenido en dicho elemento por unidad de peso seco de la planta. Las plantas acuáticas son muy productivas, por lo que la extracción de nutrientes por incorporación al tejido vegetal, puede llegar a ser muy significativa.

Como se sabe, hay tres grupos de elementos indispensables para la vida de las plantas:

- Macronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, cuya proporción en la composición de la planta es del orden de 1-2%, 0.1-1% y 0.5-1% del peso seco de la biomasa respectivamente, aunque en determinadas plantas estos contenidos pueden ser muy superiores (por ejemplo, el contenido en nitrógeno de las lentejas de agua puede llegar al 7%).

- Micronutrientes: azufre, calcio, magnesio, cuya proporción es <0.5%.

- Oligoelementos: hierro, manganeso, cinc, cobre, boro, molibdeno, que son imprescindibles para la vida de las plantas pero se encuentran en proporciones muy pequeñas, del orden de ppm, en sus tejidos.

Además, hay otros elementos que tienen un cierto papel en la fisiología de algunas especies vegetales –por ejemplo, cloro, silicio, cobalto–. También hay que mencionar que hay otros elementos que no siendo indispensables son acumulados por algunas plantas, aspecto que se aprovecha para la biorremediación, que es la recuperación a través de procesos biológicos de áreas (suelos, aguas) puntualmente contaminados por actividades industriales (metales pesados, hidrocarburos...).

Los principales elementos contaminantes de las aguas residuales domésticas son el nitrógeno y el fósforo, generalmente en una concentración del orden de 20-85 mg/l y 4-15 mg/l, respectivamente. En una estimación conservadora –para el contaminante mayoritario, el nitrógeno– se asume que la vegetación contiene un 1.5% de N y que el rendimiento es del orden de 2 kg peso seco/m<sup>2</sup>/año; cosechando la biomasa aérea se elimina del sistema del orden de 30 g de nitrógeno, equivalente a la cantidad total de nitrógeno contenido en unos 380 l de agua residual. Algunos autores indican que cosechando la biomasa se elimina del orden del 20% del nitrógeno que proviene del influente, y que la mayor proporción de remoción de este contaminante se efectúa por desnitrificación (liberación de nitrógeno gaseoso por reducción microbiológica). Con respecto al fósforo, la cantidad que puede eliminarse del sistema por extracción de las plantas es menor; citándose cantidades del orden de miligramos por litro del agua residual. Otros autores calculan que la capacidad de las macrofitas para extraer nitrógeno y fósforo está en los intervalos de 200 a 2500 kg N/ha/año y 30 a 150 kg P /ha/año.

### 3.4. Fauna

La fauna que acompaña a los humedales artificiales principalmente está compuesta por diferentes especies insectos, y en menor medida, aves, peces, anfibios y reptiles ocasionales. Los insectos juegan un papel incuestionable en la cadena trófica, y son alimento de otros organismos superiores, como aves y peces. Sin embargo, algunos insectos pueden ser plagas de la vegetación implantada en el humedal, como por ejemplo pulgones, ácaros, y pueden llegar a causar daños significativos en las plantas.

Otros insectos, como los mosquitos, pueden ser dañinos o molestos para el hombre y en algunos emplazamientos pueden constituir una plaga importante contra la que hay que actuar. Los mosquitos son un problema más probable en los sistemas que presentan superficie libre de agua que en los que el de flujo del agua es sub-superficial. Para evitarlo, se recurre a diseños específicos de la configuración del humedal y a predadores naturales de mosquitos.

El aspecto natural de los humedales artificiales y la disponibilidad de agua y alimento atraen a aves silvestres, que utilizan la vegetación como refugio, redundando en la integración del sistema en el entorno; sin embargo, ello puede conllevar que se acerque público general que quede expuesto a riesgos de salud inherentes a las aguas residuales.

#### 4. PROCESOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS HUMEDALES

Dado que los humedales artificiales son sistemas biológicos, por precaución no se aconseja su uso indiscriminado para el tratamiento de aguas residuales brutas. Por tanto, antes de introducir el agua residual en los humedales artificiales es necesario eliminar o reducir el contenido de algunos contaminantes presentes en el agua bruta. En primer lugar, se realiza un pre-tratamiento para eliminar sólidos gruesos, arenas, materias flotantes y grasas (desbaste, desarenador, desengrasador). Después se realiza un tratamiento primario que tiene por objeto reducir el contenido en sólidos totales y en suspensión y materia orgánica, y puede realizarse por técnicas blandas como el lagunaje, o convencionales (tratamiento físico-químico). A continuación el agua residual podría introducirse en el sistema de humedal artificial para su tratamiento secundario, cuyo objeto es la eliminación de la materia orgánica biodegradable. Otra alternativa es realizar este tratamiento secundario por lagunaje, y utilizar el humedal para el tratamiento terciario del correspondiente efluente. Con este tratamiento se pretende la remoción de materia orgánica no eliminada en el tratamiento secundario y compuestos inorgánicos que causan eutrofización de las aguas –nitrógeno y fósforo– como mínimo hasta los límites que marca la normativa de vertidos.

Las características del influente que recibe el humedal artificial van a depender del tipo de tratamiento que antes se ha realizado. Para el caso más común, que es el de un tratamiento primario convencional, la composición típica es la siguiente: DBO 40-200 mg/L, sólidos totales 55-230 mg/L, sólidos en suspensión 45-180 mg/L, nitrógeno total 20-85 mg/L, nitrógeno amoniacal 15-40 mg/L, fósforo total 4-15 mg/L.

Obviamente los valores que tomen estos parámetros influyen en el funcionamiento del humedal, y en la medida que sean previsibles, condicionan su diseño, de modo que se favorezcan más los procesos que implican la remoción del mayor contaminante. Cuando el humedal es efectivo, se llegan a valores inferiores a 10 mg/L para DBO, sólidos totales y en suspensión, y para el nitrógeno total, inferiores a 15 mg/L.

Como ya se ha indicado, los humedales artificiales son sistemas de apariencia simple pero muy complejos en cuanto a su funcionamiento. Actúan a modo de filtro, sumidero de sedimentos y precipitados, y como motor biogeoquímico que recicla y transforma nutrientes. Se basan en un cierto equilibrio ecológico en el que interaccionan organismos vivos e intervienen procesos de muy diversa índole –físicos, químicos, biológicos, hidrológicos–. Los mecanismos principales son de dos tipos: separaciones líquido/sólido y transformaciones de los componentes del agua residual. En el primer grupo de mecanismos se incluyen los procesos de sedimentación, filtración, absorción, adsorción, intercambio iónico, y lixiviado. En el segundo, reacciones de oxidación/reducción, ácido/base, precipitación, floculación, y reacciones bioquímicas en anaerobiosis/aerobiosis.

##### 4.1. Sólidos en suspensión

Se denominan sólidos en suspensión a aquellos sólidos que quedan retenidos en un filtro estandarizado de tamaño de poro 1.2  $\mu\text{m}$ . Los procesos que conducen a su remoción dependen del tipo de humedal y de la categoría de partículas que contenga el agua residual: sólidos sedimentables (tamaño  $>100 \mu\text{m}$ ), partículas supracoloidales (1-100  $\mu\text{m}$ ), coloides ( $10^{-3}$ -1  $\mu\text{m}$ ) y sólidos solubles ( $<10^{-3} \mu\text{m}$ ). Los sólidos sedimentables caen al fondo del sistema fácilmente por gravedad, mientras que los coloides no.

En los sistemas de flujo de agua libre (flujo superficial) los sólidos en suspensión se eliminan por mecanismos de floculación/sedimentación y filtración/intercepción. Hay que señalar que además de los sólidos que contenga el influente el sistema puede también generarlos como consecuencia de restos de plantas, microorganismos y precipitados. La sedimentación ocurre por efec-

to de la gravedad, y en condiciones ideales se rige por la ley de Stokes, que indica que la velocidad de sedimentación es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. La floculación ocurre naturalmente por unión de partículas cargadas eléctricamente que colisionan entre sí, bien por el discurrir del agua, o bien por efecto de las partes sumergidas de las plantas. Una vez alcanzado un determinado tamaño de flóculo, éstos sedimentan. Se calcula que la sedimentación de sólidos sedimentables y partículas supracoloidales ocurre, en condiciones estándar, en cerca de 3 días. El proceso de filtración del influente no suele ser muy significativo salvo que las partes sumergidas de las plantas formen un entramado denso. En cambio, el proceso de interceptación, acompañado de agrupación de partículas o adhesión de éstas a la superficie de las partes sumergidas de las plantas, sí que lo es.

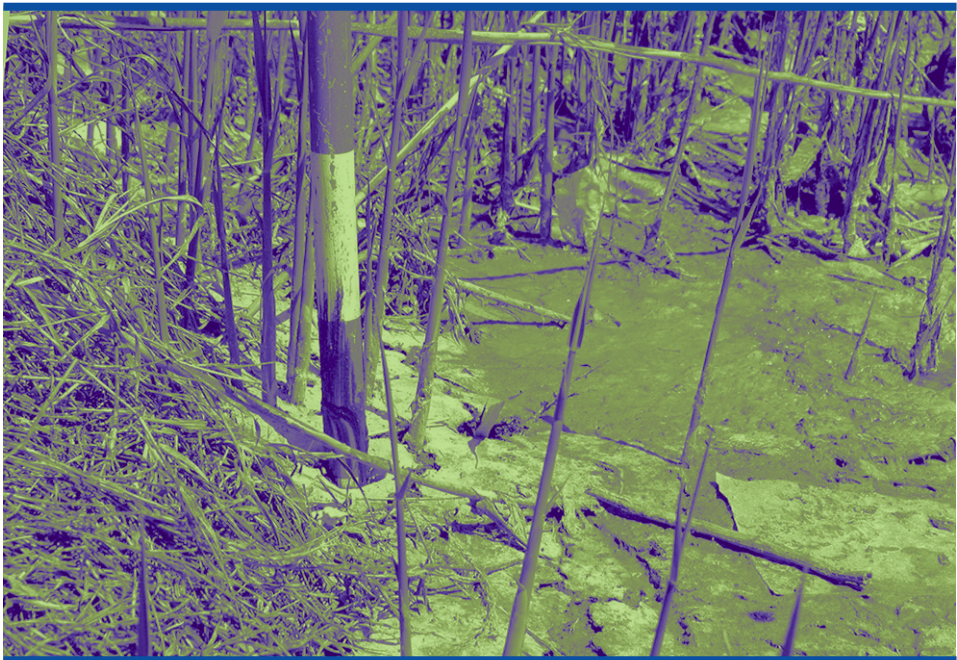
En los sistemas de flujo sub-superficial la remoción de sólidos en suspensión es muy eficaz debido a que la velocidad del flujo del influente está ralentizada y hay una gran superficie proporcionada por el lecho de arena y grava. Estos sistemas actúan como filtros horizontales,

lo que facilita los procesos de sedimentación, floculación y adsorción.

## 4.2. Materia orgánica

Los procesos que conducen a la remoción de la materia orgánica son de dos tipos: físicos y biológicos, ambos estrechamente inter-relacionados. La materia orgánica que llega en el influente puede encontrarse en forma de partículas, coloides, supracoloides o disuelta. En los tres primeros casos, los principales procesos que conducen a su separación física son similares a los indicados para los sólidos en suspensión: floculación y sedimentación. Además, pueden darse procesos de adsorción y absorción en la materia orgánica disuelta, procesos que genéricamente se denominan procesos de 'sorción' y que están relacionados con las características superficiales del sólido o cuerpo sobre el que se producen.

En los procesos biológicos intervienen organismos vivos (micro y macroscópicos) e influyen de manera drástica factores como la disponibilidad de oxígeno, el pH del medio, y la temperatura. En estos procesos se pueden dar reacciones de oxidación/reducción, hidrólisis y



*Degradación de materia orgánica en un carrizal desarrollado en aguas contaminadas*  
© M.D. Curt

fitólisis, que conducen a la biodegradación de la materia orgánica.

La materia orgánica biodegradable sirve como sustrato a múltiples organismos para desarrollarse. La disponibilidad de oxígeno en el influente, determinada a través del parámetro DBO, condiciona el tipo de microorganismos que intervienen en la degradación de la materia orgánica. Los microorganismos aerobios requieren oxígeno como aceptor de electrones disueltos para desarrollarse y son muy eficientes en la transformación de la materia biodegradable en compuestos minerales, gases, y biomasa microbiana. Por ello, las condiciones de aerobiosis son más adecuadas para reducir la contaminación por materia orgánica, que las de anaerobiosis. Los microorganismos anaerobios utilizan compuestos diferentes al oxígeno como aceptores de electrones, por ejemplo, nitratos, carbonatos o sulfatos, dando lugar a compuestos reducidos del tipo de óxidos de nitrógeno, nitrógeno, azufre, tiosulfato. Estas reacciones son menos eficientes que las que ocurren en ambientes aerobios, y para que la reducción de la contaminación orgánica sea significativa tiene que liberarse metano o hidrógeno.

Como ya se ha indicado, la disponibilidad de oxígeno es un factor fundamental para la remoción bioquímica de la materia orgánica. Esta disponibilidad dependerá del balance en el sistema entre el consumo (por respiración, fundamentalmente) y las aportaciones de oxígeno. Las posibles fuentes de oxígeno en el sistema provienen de la aireación superficial (oxígeno procedente de la atmósfera), fotosíntesis (oxígeno liberado por organismos fotosintéticos, a consecuencia de la fotoasimilación del carbono), y transferencia de la planta (liberación de oxígeno presente en el aerénquima).

La importancia de la disolución de oxígeno por aireación superficial depende de varios factores, como son temperatura, viento, flujo y concentración de oxígeno en el influente. Se estima que para un humedal de flujo libre superficial en condiciones medias, la transferencia de oxígeno por aireación es del orden de 0.5-0.9 g/m<sup>2</sup>/día.

La contribución por oxígeno procedente de la fotosíntesis está en función de la cantidad de organismos fotosintéticos que se desarrollan

en el agua. En los sistemas FWS son microorganismos fotosintéticos (fitoplacton y perifiton) y plantas sumergidas. Se estima que en condiciones adecuadas se pueden generar del orden de 2.5 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/d en las horas de luz. Hay que considerar el balance global diario, ya que el consumo de oxígeno por respiración durante la noche puede llegar a equipararse con la producción diaria. Por esta razón, la concentración de oxígeno disuelto oscila en el día y no es homogénea en la columna de agua. En la zona inmediata a plantas sumergidas hay mayor concentración de oxígeno disuelto.

La transferencia por difusión de oxígeno al agua residual desde las partes sumergidas de las plantas emergentes se produce como consecuencia de la existencia de vías de aireación interconectadas en los tejidos de estas plantas (aerénquima). La importancia de esta transferencia de oxígeno para la depuración del agua residual ha sido estudiada por diferentes autores, pero no se pueden inferir conclusiones determinantes porque los humedales artificiales son ecosistemas extremadamente complejos y dinámicos. Algunos autores indican que el oxígeno transferido se iguala al respirado, y que por tanto no habría una ganancia neta. Sin embargo, según otros estudios sí sugieren que habría ganancia neta, citándose un rango de 0 a 28.6 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/d.

Las reacciones de hidrólisis son fundamentales para transformar la materia orgánica sólida -en forma de partículas-, en compuestos orgánicos de más bajo peso molecular, que resultan más fácilmente atacables por microorganismos. Las tasas de degradación dependen de la degradabilidad de estos compuestos, la temperatura y condiciones de disponibilidad de oxígeno. En condiciones aerobias, los productos finales son compuestos oxidados de nitrógeno y azufre, anhídrido carbónico y agua. En condiciones anaerobias, se producen ácidos orgánicos y alcoholes, y cuando ocurre metanogénesis los productos finales son metano, anhídrido carbónico e hidrógeno.

### 4.3. Nitrógeno

El nitrógeno está presente en las aguas residuales en forma de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>),

amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitrógeno orgánico -de mayor a menor nivel de oxidación-. Todas estas formas, incluido el nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ), forman parte del ciclo del nitrógeno porque están inter-relacionadas bioquímicamente. La concentración de nitrógeno total en el influente del humedal, procedente de un tratamiento primario, suele estar en el rango de 8 a 85 mg/L, correspondiendo en general los valores más bajos a los efluentes de un pre-tratamiento de lagunaje, y los valores más altos a los de un pretratamiento convencional. El nitrógeno amoniacal (1-40 mg/L) y el nitrógeno orgánico son las dos formas predominantes en el influente. En cambio, el nitrógeno nítrico suele ser muy bajo (0-1 mg/L), correspondiendo los valores más altos a los efluentes del pre-tratamiento por lagunaje. Los procesos de remoción del nitrógeno en los humedales artificiales son de tipo físico-químico y biológicos.

#### 4.3.1. Procesos físico-químicos de remoción de nitrógeno

La remoción por los procesos físicos de filtración, intercepción, floculación y sedimentación ocurre principalmente para la fracción de nitrógeno orgánico, ya que, como constituyente de materia orgánica, está asociado con sólidos en suspensión. Además, en las biopelículas que existen asociadas a las plantas emergentes y a restos vegetales se dan procesos de sorción de nitrógeno. El intercambio catiónico del ión amonio en las arcillas del sustrato del humedal puede también ocurrir; si bien su contribución está limitada a la capacidad de intercambio catiónico del sustrato. Otro proceso físico-químico a indicar es el desprendimiento de amoníaco gaseoso (volatilización), por efecto de la variación del pH del agua. El pH puede subir en puntualmente en momentos de alta actividad fotosintética, y en condiciones determinadas de temperatura y alcalinidad el ión amonio pasa a amoníaco gas, que puede desprenderse del sistema.

#### 4.3.2. Procesos biológicos de remoción de nitrógeno

En relación a los procesos biológicos, o procesos en los que media la intervención organismos

vivos, hay que mencionar: amonificación, nitrificación, desnitrificación, fijación de nitrógeno y asimilación por las plantas.

La amonificación, también denominada hidrólisis o mineralización del nitrógeno orgánico, consiste en la transformación biológica del nitrógeno que está en la materia orgánica a nitrógeno amoniacal, proceso que ocurre durante la degradación de la materia orgánica. Puede ocurrir en condiciones aerobias o anaerobias; hay estudios que indican que en condiciones anaerobias la amonificación ocurre más lentamente que en condiciones aerobias. La velocidad con que ocurre este proceso depende del pH, y aumenta con la temperatura. Como referencia, se cita que las aguas residuales domésticas se hidrolizan totalmente en 19 horas a temperaturas de 11-14°C. El amonio formado puede sufrir procesos subsecuentes, como inmovilización por intercambio catiónico, volatilización en forma de amoníaco gaseoso, absorción por organismos fotosintéticos, asimilación por microorganismos y nitrificación.

La nitrificación es el proceso de conversión biológica del amonio a nitrato por parte de microorganismos aerobios nitrificantes, suspendidos en el agua o situados en las biopelículas de las superficies sumergidas. El proceso se realiza en dos fases; la primera es la oxidación del amonio a nitrito por bacterias del género *Nitrosomona*, y la segunda, la del nitrito a nitrato por bacterias del género *Nitrobacter*. La velocidad del proceso depende del pH y la temperatura. Se requieren condiciones aerobias -del orden de 4.3 g de  $\text{O}_2$  son necesarios para oxidar 1 g de nitrógeno amónico a nitrato- y suficiente alcalinidad -del orden de 7.14 g  $\text{CaCO}_3$ -. El ión nitrato, al contrario que el amonio, no se inmoviliza en el sustrato, sino que permanece en el agua; de allí puede ser absorbido por plantas o microorganismos, o ser reducido (desnitrificación).

La desnitrificación, o reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso, se produce en condiciones anaerobias por microorganismos -bacterias heterótrofas- que utilizan el nitrato como aceptor de electrones y el carbono orgánico como donante electrónico; es decir, son condiciones indispensables la ausencia de oxígeno y la disponibilidad de carbono orgánico. Entre estos dos

requerimientos, el que suele ser más limitante es el de la disponibilidad de carbono, ya que en el fondo del humedal se mantienen condiciones anóxicas. Como mínimo es necesario 1 g de carbono por g de nitrógeno nítrico para su desnitrificación. El carbono puede proceder bien de la contaminación orgánica del influente o bien de los restos de plantas y otros organismos. Los productos de la desnitrificación son nitrógeno molecular  $N_2$ , y óxido de nitrógeno  $N_2O$ . La desnitrificación tiene lugar, principalmente, en los sedimentos del humedal y en biopelículas de zonas con muy bajo oxígeno disuelto y con alta disponibilidad de carbono, como son las zonas del fondo en las que hay restos vegetales descomponiéndose o exudados de plantas. El proceso origina una cierta alcalinidad, aproximadamente 3 g de alcalinidad expresada como  $CaCO_3$ , por cada g de nitrógeno nítrico reducido, y la velocidad a la que se produce depende del pH y la temperatura. El nitrógeno gaseoso pasa a la columna de agua, quedando a disposición de organismos que pueden fijarlo, o se libera a la atmósfera. La pérdida a la atmósfera es más fácil en las zonas del humedal que tienen la lámina de agua sin vegetar que en aquellas completamente cubiertas.

El proceso de asimilación del nitrógeno gas  $N_2$  a nitrógeno orgánico se denomina fijación del nitrógeno, y se realiza por organismos que contienen enzima nitrogenasa, como algunas bacterias y algas verde-azuladas, en condiciones anaerobias o aerobias. Los lugares probables en los que puede ocurrir la fijación, en los sistemas FWS, son: la capa superficial del agua en las zonas abiertas, en los sedimentos, en la rizosfera oxidada y sobre la superficie de hojas y tallos de las plantas.

El proceso de extracción de N por las plantas consiste en la asimilación de formas inorgánicas del nitrógeno para formar compuestos orgánicos nitrogenados estructurales de la planta. Como se sabe, el nitrógeno es un macronutriente indispensable para las plantas; cuanto mayor es la tasa de crecimiento de la planta mayor es la extracción de nitrógeno. Se estima que la vegetación de los humedales extrae entre 0.5 y 3.3 g de  $N/m^2/año$ ; entre las especies emergentes las menos exigentes son los juncos y juncias, y las más exigentes las enneas o espadañas. Las plantas acumulan el nitrógeno princi-

palmente en sus órganos vegetativos verdes (hojas, tallos). Para eliminar ese nitrógeno del sistema hay que retirar periódicamente del humedal la biomasa producida; de otro modo el nitrógeno se recicla en el sistema debido a la incorporación de los restos vegetales en el humedal.

#### 4.3.3. Comportamiento del sistema respecto al nitrógeno

El nitrógeno orgánico asociado a sólidos, que llega a un sistema de depuración con macrofitas, en el que se mantenga capa de agua, sufre un proceso de separación por procesos físicos, parte se sedimenta, otra parte se intercepta por las partes sumergidas de las plantas, otra fracción pasa a formar parte de las biopelículas, y otra parte queda en suspensión, flotando o siguiendo el flujo del agua. Los compuestos biodegradables son amonificados poco a poco por organismos aerobios o anaerobios presentes en biopelículas y sedimentos. Parte del amonio es extraído por las plantas, especialmente durante la época de crecimiento. El resto del amonio puede permanecer en el sedimento durante un tiempo o pasar a la columna de agua. En condiciones de pH elevado y temperatura adecuada, en las zonas de aguas libres sin vegetar, la volatilización del amoníaco puede llegar a ser significativa. En otras circunstancias, en las proximidades de la lámina de agua en superficies aireadas —es decir, sin cubierta vegetal— y otras zonas en las que exista suficiente oxígeno disuelto, el amonio puede ser nitrificado por organismos nitrificantes. También puede ocurrir algo de nitrificación en las superficies adyacentes a los rizomas de las plantas emergentes, ya que en esas superficies la planta libera algo de oxígeno. Sin embargo, allí el proceso es poco intenso ya que las plantas están enraizadas en los sedimentos donde las condiciones son anaerobias. Lo normal es que cerca de la entrada del influente al humedal no haya nitrificación porque la carga orgánica, y por tanto, la demanda en oxígeno, es alta. Por el contrario, la nitrificación ocurre en zonas más alejadas, sin vegetación, suficientemente aireadas. El nitrógeno nítrico, ya sea el formado por nitrificación o el que procede del influente, puede ser utilizado como nutriente por microorganismos y plantas, o pasar a los sedimentos. En condiciones anaerobias y en presencia de materia orgánica puede

ser desnitrificado por microorganismos que se encuentren suspendidos en el agua o asociados a biopelículas, y de esta manera, el nitrógeno gaseoso pasar a la atmósfera.

En un humedal de flujo de agua superficial, las transformaciones que sufre el nitrógeno que entra con el influente se desarrollan más o menos secuencialmente aguas abajo: separación de nitrógeno orgánico en las proximidades de la entrada, seguida de liberación de amonio, nitrificación y desnitrificación. Si hay una alta demanda en oxígeno la nitrificación puede ser despreciable. Las plantas atenúan la secuencia indicada, debido a que crecimiento y senescencia son procesos cíclicos; la extracción de nitrógeno (asimilación por la planta) se acentúa en primavera-verano y la incorporación de nitrógeno al sistema (caída y descomposición de restos vegetales) en otoño-invierno.

En términos cuantitativos, los procesos más importantes de remoción del nitrógeno en el humedal de flujo de agua superficial son: la extracción por las plantas seguida del cosechado de la biomasa, y la nitrificación seguida de desnitrificación. Estos procesos son más activos en la época estival, ya que entonces las plantas muestran una alta tasa de crecimiento absoluto y las temperaturas favorecen la nitrificación/desnitrificación.

En los sistemas de flujo subsuperficial, los procesos físicos de separación del nitrógeno orgánico asociado a los sólidos en suspensión son muy eficaces, ya que el lecho de grava/arena proporciona una gran superficie de interceptación. El sistema además, favorece reacciones anaeróbicas asociadas con la existencia de biopelículas que recubren los sólidos inertes del lecho. El nitrógeno orgánico sufre amonificación, y el amonio liberado, si está al alcance de las raíces, puede ser asimilado por las plantas; en caso contrario, discurre con el flujo del agua hacia la salida. Dado que la oxigenación en este tipo de humedales suele ser muy pequeña, el proceso de nitrificación es prácticamente despreciable, ya que sólo puede suceder en la capa adyacente a la superficie de los rizomas o en la cercana a la superficie del lecho, aguas abajo. Este tipo de sistema es eficaz en la desnitrificación de los influentes nitrificados, debido a su condición predominantemente anaerobia, siempre y cuan-

do exista un cierto suministro de carbono orgánico para la actividad microbiana.

## 4.4. Fósforo

El fósforo se encuentra en las aguas residuales en forma de fosfatos, ya sea disueltos o en partículas. Los fosfatos se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados (piro- meta- y poli-fosfatos) y fosfatos en compuestos orgánicos (fósforo orgánico). Los fosfatos orgánicos se forman por procesos biológicos, y en el agua residual son componentes de restos de alimentos y otros residuos orgánicos, y organismos. El fósforo inorgánico del agua residual procede generalmente de productos de limpieza; otra fuente posible son los fertilizantes agrícolas. El rango de valores de fósforo total en el influente del humedal es de 3-15 mg/L, en su mayoría como ortofosfatos (2-12 mg/L).

El fósforo, junto el nitrógeno, es uno de los elementos más importantes en los ecosistemas. Sin embargo, a diferencia de nitrógeno, no hay un compuesto gaseoso significativo del fósforo que cierre el ciclo, sino que la tendencia, en la naturaleza, es a que el fósforo se acumule en sedimentos, cuando no es constituyente de organismos. Así pues, el principal mecanismo de remoción de fósforo de las aguas residuales necesariamente está basado en la acumulación en sedimentos y biomasa.

### 4.4.1. Procesos fisico-químicos de remoción de fósforo

El fósforo que está en forma de partículas (sólidos) puede depositarse por sedimentación en el fondo del humedal, o bien quedar atrapado entre la maraña que forman las plantas emergentes y adherirse en la superficie que forman las biopelículas, y desde allí quedar susceptible a sufrir otros procesos de tipo biológico.

Con respecto al fósforo soluble, hay que indicar que su dinámica es compleja, e incluye procesos fisico-químicos de adsorción/absorción, intercambio, precipitación, solubilización, y redox. Los procesos de adsorción/absorción se dan sobre biopelículas en plantas y residuos y sobre los sedimentos del humedal. En los sedi-

mentos suele ocurrir un intenso intercambio de fósforo con la columna de agua. Los fosfatos pueden formar precipitados insolubles de hierro, calcio y aluminio, o ser adsorbidos por las arcillas, materia orgánica (turba) y algunos compuestos inorgánicos (óxidos e hidróxidos de aluminio). Las condiciones básicas favorecen la formación de fosfatos de calcio insolubles; en condiciones ácidas pueden ocurrir precipitados de hierro y aluminio. Cuando hay cambios de pH los precipitados pueden resolubilizarse. El fosfato adsorbido en las arcillas puede liberarse por intercambio de aniones, o por un bajo potencial redox. Por ejemplo, en condiciones reductoras, los compuestos con hierro férrico se reducen a compuestos de hierro ferroso, que son más solubles y liberar el ión fosfato. También en condiciones anóxicas los fosfatos férricos y aluminicos pueden hidrolizarse ocasionando la solubilización de fosfatos.

Al comienzo del funcionamiento del humedal, los procesos que conducen a la inmovilización en el sustrato/sedimento del fósforo que llega en el influente, son intensos, y por ello suele observarse una eficacia alta en la remoción de la contaminación por fósforo. Sin embargo al cabo de un tiempo –algo más de un año– se alcanza el límite de la capacidad de inmovilización en el sustrato/sedimento, y entonces este mecanismo de remoción pasa a ser poco significativo.

#### 4.4.2. Procesos biológicos de transformación de los fosfatos

El fósforo orgánico disuelto, fósforo orgánico en partículas y fósforo insoluble no están disponibles para las plantas, a menos que sean transformados en fósforo inorgánico soluble. En el humedal estas transformaciones pueden ocurrir por la intervención de microorganismos que se hayan suspendidos y en biopelículas sobre superficies de plantas emergentes y en los sedimentos. Una vez solubilizado, puede ser asimilado por plantas y otros organismos –bacterias, algas– y por tanto, ser temporalmente retirado del agua. Se estima que la cantidad neta de fósforo que extraen las plantas emergentes oscila entre 1.8 y 18 g P/m<sup>2</sup>/año; esta extracción sucede durante el período de crecimiento de las plantas. Después, si no se retira la biomasa vegetal (otoño), el fósforo

volvería al efluente debido a la senescencia y muerte de los tejidos vegetales, que se incorporan al agua. Sin embargo, también parte del fósforo que devuelven los restos vegetales al sistema puede pasar a formar deposiciones en los sedimentos, dando lugar a su inmovilización.

#### 4.4.3. Comportamiento del sistema respecto al fósforo

La remoción significativa del fósforo se debe principalmente a la deposición e inmovilización de los fosfatos en los sedimentos; la vegetación contribuye con las extracciones de fósforo, siempre y cuando la biomasa se retire del sistema. Como ya se ha indicado, una parte importante del fósforo del influente sigue una dinámica compleja de reciclado en el mismo sistema, que puede resumirse en la secuencia solubilización-extracción-incorporación; ocasionalmente se forman precipitados o deposiciones que conducen a su inmovilización.

La remoción de fósforo por las extracciones de vegetales y otros organismos sigue un patrón estacional en los climas templados, ya que el crecimiento y senescencia de las plantas depende del clima. Típicamente, en otoño se registra una subida del fósforo en el efluente, como consecuencia de la incorporación del fósforo contenido en los restos vegetales.

### 4.5. Patógenos

Las aguas residuales pueden contener un amplio espectro de organismos patógenos, entre los que se incluyen helmintos, protozoos, hongos, bacterias o virus. Sin embargo, para caracterizar rutinariamente el grado de contaminación del agua únicamente se realiza la determinación de un grupo de microorganismos que sirva como índice de contaminación fecal, ya que la caracterización completa sería inabordable económicamente. El indicador más común utilizado es el recuento de coliformes fecales, que en los influentes de los humedales oscila entre 0.8 y 7.0 colonias/100 ml.

Los patógenos pueden encontrarse en la fracción de sólidos del influente, o en suspensión en el agua. En el primer caso, los patógenos



pueden separarse del agua por los procedimientos asociados con la remoción de sólidos, es decir, por sedimentación, interceptación y adsorción/absorción. Una vez separados pueden quedar retenidos en las biopelículas o en el sedimento, o bien volver a incorporarse al flujo. En cualquier caso, para sobrevivir tienen que entrar en competencia con los otros organismos no patógenos, y soportar las condiciones ambientales del humedal. Estas condiciones no suelen ser apropiadas para su supervivencia, ya que como organismos intestinales requieren sustratos ricos y altas temperaturas. En consecuencia, la mayor parte de los patógenos no sobrevive por falta de adaptación al medio; otros desaparecen por organismos depredadores, o si están próximos a la superficie del agua, por efecto de la radiación ultravioleta. En cambio, otros patógenos como virus y protozoos que se dispersan por esporas, son más resistentes. Por ello, en función del destino del efluente del humedal puede ser necesario hacer un tratamiento de desinfección antes de su descarga.

#### 4.6. Metales traza

El influente de los humedales artificiales puede contener metales traza que haya que eliminar en el sistema. Algunos metales son necesarios en una cierta cantidad -que depende del metal- para el crecimiento de plantas y animales, pero en cantidades altas pueden resultar tóxicos, como por ejemplo, el cromo, cobalto o cobre. Otros, en cambio, no tienen papel biológico y son tóxicos en cantidades muy pequeñas, como el arsénico, mercurio o cadmio. Cuando se sabe fehacientemente que el agua residual tiene contaminación significativa por metales, es necesario llevar a cabo tratamientos específicos de descontaminación, que exceden a los objetivos de los humedales artificiales de tratamiento de aguas residuales de población. Algunos de esos tratamientos involucran métodos biológicos, y se denominan genéricamente 'biorremediación'. Precisamente uno de los mecanismos que se utiliza en bioremediación es la extracción por las plantas, aprovechando la capacidad de acumulación que algunas especies vegetales tienen con respecto a algún metal.

Los metales que lleva el influente de los humedales artificiales se pueden encontrar en

formas solubles o insolubles en los sólidos suspendidos. En este último caso su separación sucede por procesos parecidos a los que intervienen en la remoción de la contaminación por sólidos. También puede ocurrir su solubilización, dependiendo del pH y del potencial redox.

Los procesos de remoción de metales de tipo físico-químico son: el intercambio catiónico y formación de quelatos con el sustrato o con los sedimentos, la unión con materiales húmicos y la precipitación de sales insolubles como sulfatos o carbonatos. Estos procesos conducen a una acumulación en el fondo del humedal, y por tanto, a la separación de los metales del flujo de agua. Si los sedimentos o el sustrato del humedal se remueven puede ocurrir la resuspensión de los metales y ocasionalmente su solubilización.

Los procesos biológicos de remoción de metales se basan en la extracción por plantas, algas y bacterias. En el caso de las macrofitas, la extracción se realiza a través del sistema radicular; y la capacidad de extracción depende del tipo de metal y de la especie vegetal que se trate. Para similar capacidad de extracción, cuanto más biomasa pueda formar la planta mayor será la cantidad absoluta que se habrá eliminado del sistema



