

Corrosión y agresividad en aguas residuales

Mecanismos, ejemplos y costes

Rafael MARÍN GALVÍN

Control de Calidad y Medio Ambiente
EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE CÓRDOBA S.A.

Los fenómenos corrosivos y agresivos que agreden a las infraestructuras que componen los saneamientos, tanto colectores de aguas residuales como las propias EDARs, tienen tres orígenes: fenómenos electroquímicos, procesos químicos y actividad microbiana. La conjunción de todos ellos provoca problemas de degradación prematura de materiales en todo el sistema de saneamiento, dado que la ubicación de los agentes corrosivos y agresivos se extiende desde el agua residual a las atmósferas en contacto con ella y a los sólidos separados de forma forzada o no de la misma. La acción negativa de la corrosión y agresividad en nuestros saneamientos provoca pérdidas anuales del orden de 10.000 M€ al año en España, además de diversos costes no económicos de índole social, sanitaria y ambiental.

Introducción

Las aguas residuales, tanto urbanas como industriales son un medio complejo, rico en muchas sustancias, más o menos degradadas, orgánicas e inorgánicas, así como en cantidades ciertamente importantes de microorganismos que las dotan de un potencial de interacción con el medio muy notable. También por su propia dinámica asociada se constituyen en un medio que paulatinamente va modificando sus características fisicoquímicas y microbiológicas a lo largo de la red de saneamiento, desde su generación en nuestros hogares, en nuestros centros comerciales, centros sanitarios, e industrias, su conducción por colectores y emisarios, hasta su llegada a las estaciones depuradoras, pasando a ser un medio progresivamente más desoxigenado y con más carácter reductor desde el punto de vista químico.

Si bien el agua natural ya de por sí es capaz de afectar al medio en contacto con ella, esta actividad se potencia sensiblemente en el ámbito de las aguas residuales. Así pues, el objetivo de este artículo será pasar revista a los fundamentos de la dinámica de la corrosión y agresividad en redes de saneamiento, tipos de agentes corrosivos y agresivos presentes en las aguas residuales, presentar algunos ejemplos prácticos de los problemas generados, finalizando con la reseña de los costes asociados a esta grave problemática.

Agentes corrosivos y agresivos en el agua residual: mecanismos

Podemos hablar de tres mecanismos corrosivos: electroquímicos, químicos y microbianos.

Corrosión electroquímica

Cualquier metal sumergido en una disolución tiende a ionizarse parcialmente, con lo que sus iones (cargados positivamente) pasan a disolución mientras el metal de partida quedaría con carga negativa. El potencial de electrodo para este proceso se rige por la ecuación de **Nernst**,

$$E = (RT / nF) \times \ln (P / \pi) = (RT / nF) \times \ln (C / a_m)$$

siendo, "n" la valencia del metal (carga positiva), "T" la temperatura (°K), "R" la constante de los gases perfectos, "P" presión, "π" presión osmótica, "a_m" actividad de los iones metálicos en disolución, "C" un valor relacionado con la concentración de iones en el metal, y "F" el número de Faraday. Resolviendo la ecuación para T = 25 °C se obtendrían los denominados *potenciales normales de electrodo* que definen las

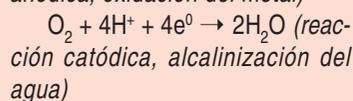
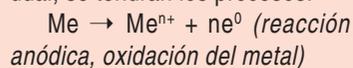
posibilidades de interacción redox entre sustancias. En la práctica, para un electrodo genérico se tendría,

$E = E^0 + (0,058 / n) \times \log a_m$
 que aplicado al caso del electrodo normal de H_2 , a 1 atm de presión y 25 °C, se iguala a cero, siendo la base por convenio para comparar potenciales de electrodo entre pares redox.

Las especies electroactivas contactan, bien directamente o bien a través de un medio (agua residual) que transmite la corriente eléctrica, dando lugar a que uno de los electrodos, el de potencial de oxidación más negativo o menos positivo, se vaya disolviendo poco a poco: este fenómeno es la *corrosión electroquímica*, la cual puede desarrollarse, tanto en medios aireados como desaireados (lo segundo, lo más habitual en aguas residuales).

Corrosión en medios aireados

Para un metal genérico "Me", en contacto con un agua residual, se tendrán los procesos:



El potencial de oxidación del par Me/Me^{n+} debe ser más bajo que el del par O_2/H_2O (+1,23 V) para que las reacciones conduzcan hacia la oxidación del metal. Aplicando la ecuación de **Nernst** y considerando "n=2" (caso del Fe, por ejemplo) quedaría que,

$E = E^0 - (RT / F) \times \ln [OH^-] + (RT / 4F) \times \ln P_{O_2}$ lo que indica que el potencial, es decir, la oxidación del metal, se favorecerá con el incremento de pH y de la presión parcial de O_2 (concentración) en ella. El Fe oxidado se transforma en hidróxidos, tipo $Fe(OH)_2$ y $Fe(OH)_3$, los cuales constituirían los productos prácticos de corrosión en tuberías, colectores e instalaciones, dándose colateralmente la alcalinización del agua por consumo de iones H^+ . Además, la deposición sobre el metal de hidróxidos actúa ralentizando la difusión de O_2 desde el agua, con lo que se propi-



Figura 1. Trozo de tubería metálica severamente corroída mostrando zonas totalmente perforadas.

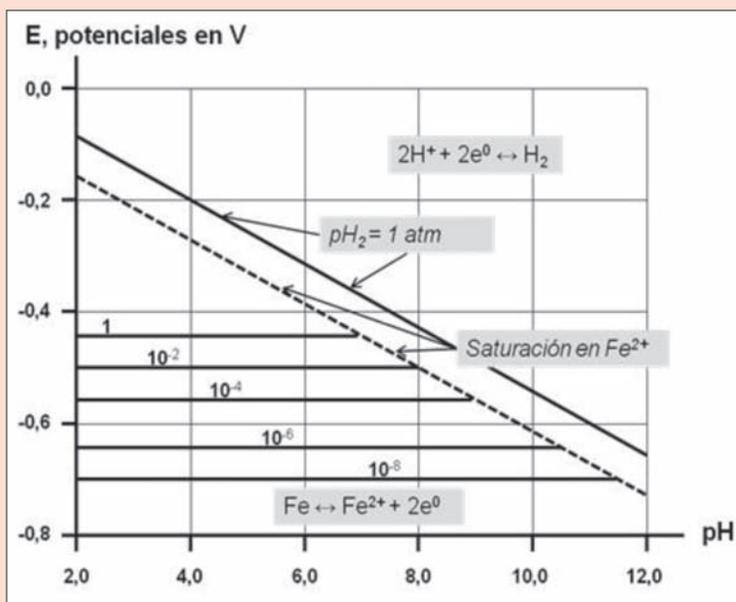


Figura 2. Diagrama de estabilidad para el sistema redox Fe^{2+}/H_2 en medios desaireados. Las líneas horizontales marcan la concentración de Fe^{2+} disuelto en función de potencial y pH: así, para $pH=4$ y $E \approx -0,7$ V, $[Fe^{2+}] \approx 10^8$ mol/kg.



Figura 3. Corrosión electroquímica inter na y exter na en tuberías de fundición de hierro. Obsérvense tanto picaduras y perforaciones como acumulaciones de depósitos.



Figura 4. Conducción de agua con deposiciones calcáreas debidas al efecto de aguas incrustantes (precipitación de CaCO_3 y otros materiales asociados).

cia la retroalimentación del proceso anódico, y la extensión de la corrosión con la aparición de perforaciones por todo el material (figura 1).

Corrosión en medios desaireados

Es la más frecuente en aguas residuales. Las reacciones redox serían (por ejemplo, para Fe).

$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (reacción anódica, oxidación del metal).

$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (reacción catódica, con generación de hidrógeno).

El efecto práctico sigue siendo la disolución de Fe que proseguirá mientras el medio contenga suficiente cantidad de iones H^+ ($\text{pH} < 10,5$) o exista suficiente cantidad de Fe^{2+} que recubra las zonas metálicas expuestas del acceso del O_2 . Como diferencia con los medios aireados, el Fe^{2+} en medio desaireado no tendría tendencia a oxidarse después a Fe^{3+} .

Para estudiar estos procesos se desarrollan los diagramas de **Pourbaix**, en los que aplicando las ecuaciones de **Nernst** para diferentes pares de electrodos que podrían interactuar mutuamente, se obtienen las estabildades de las especies electroactivas en función del pH, considerando sus valores de potencial. La figura 2 presenta el diagrama de estabilidad para el sistema hierro-agua en medio desaireado.

Por otra parte, la corrosión en medios desaireados sólo cesará en aguas estancadas o sin flujo circulatorio al no darse allí el arrastre de los depósitos de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ formados. Finalmente, este mecanismo provoca la generalización de una corrosión bastante uniforme en toda la extensión del metal, con la coexistencia de muchas zonas anódicas, focos de importante alteración.

Corrosión por aireación diferencial

Conjugando los dos tipos de corrosión metálica vistos se puede esperar que las zonas del metal sin contacto directo con O_2 (recodos, huecos de roscas, fisuras, etc.) constituyan zonas anódicas activas de disolución de metal mientras que las que estén en contacto con O_2 serán zonas catódicas preservadas de la corrosión. Entre las dos se establece una diferencia de potencial y corrosión asociada, proceso al que se denomina "aireación diferencial" (figura 3).

Como resumen de lo dicho, todos los metales con potenciales de par inferiores a +1,23 V serán oxidados por el O_2 , mientras todos aquellos con potenciales de par inferiores a 0,00 V, lo serán por el H_2O . En la práctica, excepto los metales nobles (Au, Ag, Pt y Rb, como más emplea-

dos habitualmente) todos los metales en presencia de agua se oxidarán más o menos.

Procesos químicos corrosivos y agresivos

Fenómenos de agresividad ligados al equilibrio carbónico

Sin entrar en más detalles recordemos que en aquellas aguas con índice de **Langelier** $i_L < 0$, o índice de **Ryznar** $i_R > 6,8$, se daría la paulatina disolución de carbonatos del medio, en este caso de hormigones y materiales de construcción de colectores y otras instalaciones no metálicas en contacto con las aguas residuales, lo cual favorecerá posteriormente ulteriores ataques corrosivos o microbianos y la potenciación de la degradación del elemento de que se trate.

Por su parte, para índices de **Langelier** $i_L > 0$, o de **Ryznar** $i_R < 6,2$, el agua sería incrustante frente al equilibrio carbónico con la deposición asociada de carbonatos sólidos sobre las superficies en contacto con ella (la figura 4 presenta un ejemplo práctico de incrustaciones calcáreas).

Mineralización

Las sales aumentan la conductividad disminuyendo la resistencia al flujo de las corrientes de corrosión que resultan favorecidas: Cl^- , SO_4^{2-} , así como Br^- y NO_3^- , propician el inicio de fenómenos corrosivos (aún en bajas concentraciones). El efecto de los cloruros es muy marcado: al principio se da una acumulación de iones Cl^- (transportados vía electrolítica) en la zona anódica, mientras paralelamente se produce un incremento de iones H^+ por precipitación de hidróxidos de Fe. El efecto global es la generación de trazas de HCl que, unido al O_2 , provocan picaduras en las zonas metálicas. Este efecto se potencia en las aguas más salobres hasta concentraciones de unos 10^4 g/l de NaCl, punto a partir del cual se observa una reducción en la solubilidad del oxígeno y un descenso en la agresividad del sistema.



Los iones sulfato también potencian los fenómenos corrosivos por tres causas: incremento de la salinidad del agua, por poder ser convertidos en sulfuros vía microbiana y a través de un proceso específico de degradación de hormigones, que discurre en dos pasos:

(a) Sulfatación de la cal libre del cemento por los sulfatos del agua, según el proceso,
 $\text{Na}_2(\text{SO}_4) + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$

(b) Reacción entre sulfato hidratado y aluminato del cemento, generando la "sal de Candlot" de alta expansividad, y posterior descomposición y disgregación del material base, de acuerdo a,
 $3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 13\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}, 3\text{CaSO}_4, \text{Al}_2\text{O}_3, 31\text{H}_2\text{O}$
 donde la presencia de Mg (ligado a la dureza del agua) incrementa la tasa de descomposición.

Para finalizar, si bien cantidades del orden de 1 mg/l de Cu^{2+} aceleran la corrosión por la electrodeposición de Cu metálico (reducido a partir de Cu^{2+}) en las zonas catódicas del sistema, el pH alcalino, y la de algunos aniones tales como cromatos, $\text{SiO}_4^{=}$ y PO_4^{3-} es beneficiosa ya que estos iones actúan como moderadores de la velocidad de corrosión.

Temperatura

Diferencias de temperatura de 15 °C entre distintas zonas de un material llevan asociadas diferencias de potencial superiores a los 40-50 mV, e importantes efectos corrosivos.

Acidez y basicidad

Los ácidos inorgánicos fuertes (HCl , HNO_3 , H_3PO_4 , H_2SO_4 , HF) así como los orgánicos fuertes (cítrico, acético) promueven el ataque a hormigones, cementos y metales (figura 5).

Por otro lado, NaOH , KOH y Na_2CO_3 , especialmente, promueven la solubilización inducida de los aluminatos y alúmina presentes en cementos y similares (figura 6). También podría ocurrir este efecto con la presencia de $\text{Mg}(\text{OH})_2$, proceso acelerado si existe amoníaco.

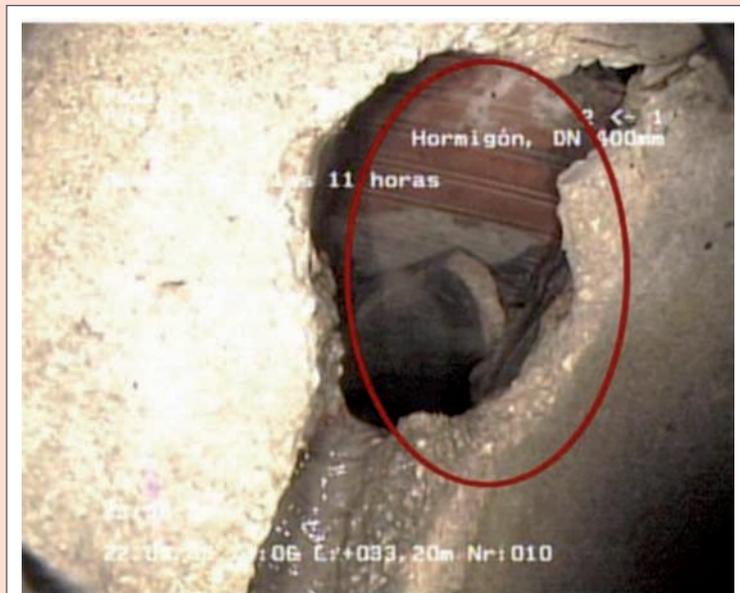


Figura 5. Agresión ácida sobre una acometida industrial de aguas residuales a un colector general de saneamiento (superior); (debajo) efectos de un vertido ácido sobre elementos de obra y metálicos en un pozo de registro.

Contenido en NH_3

Afecta a hormigones y cementos mediante el desarrollo de procesos microbianos nitrificantes, que generarían nitratos y ácido nítrico en medios aireados, así como por su posibilidad de reaccionar con la cal de los cementos acelerando su degradación.

Presencia de sulfuros y ácido sulfhídrico

El sistema $\text{H}_2\text{S}/\text{HS}^-/\text{S}^{=}$ en aguas residuales o atmósferas en contacto con ellas genera sulfuros metálicos por disolución de metales, pudiendo además, ser oxidados al sistema $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{SO}_4^{=}$,

altamente corrosivo (figura 7). Por otra parte, los $\text{S}^{=}$ también podrían reducir el Fe^{3+} del $\text{Fe}(\text{OH})_3$ generando FeS con menor volumen que el primero y propiciando la descomposición de los tubérculos de hidróxidos ya existentes en los materiales, que después retroalimentarían el proceso: $\text{pH} < 6$ y aumentos de temperatura favorecen estas dinámicas.

Corrosión microbiana

Siempre posterior a la electroquímica y química, propicia la formación de concreciones, tubérculos, e incluso perforaciones y fisuras en materiales. Podemos





Figura 6. Efecto de ver tidos alcalinos sobre una acometida de aguas residuales industriales.

considerar cuatro tipos de microorganismos como más activos en corrosión microbiana.

Bacterias del ciclo del hierro y del manganeso

Son bacterias quimirotóxicas que oxidan Fe^{2+} a Fe^{3+} a pH ácido preferentemente (pH=4-6), gracias a contar con enzimas redox (flavinas). Pertenecientes a este grupo tenemos:

- Clamidobacterias: *Lepthothrix ochracea*, *L. crassa* y *L. discophora*.
- Crenotricáceas: *Crenothrix polyspora* y *Clonothrix fusca*.
- Siderocapsáceas: *Siderocapsa geminata*, y especies de *Ferrobacillus* y *Sideromonas*.
- Gallioneláceas: *Gallionella ferruginea* y *G. major*.

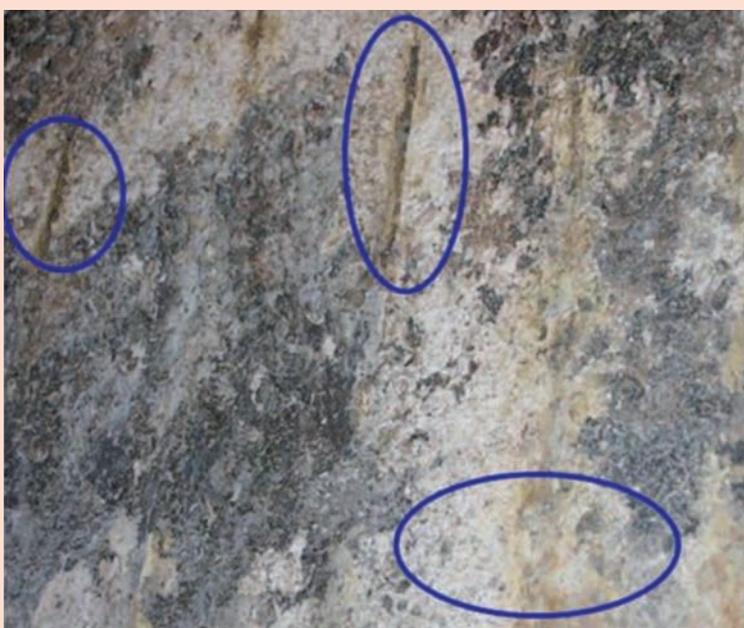


Figura 7. Pared de un emisario general de aguas residuales con muestras típicas de la acción conjunta de las corrosiones férricas y las debidas a sulfuros.

El $Fe(OH)_3$ formado es almacenado en secreciones mucilaginosas que adoptan forma de vainas, cápsulas y tubérculos (figura 8). Las cápsulas suelen estar huecas, conteniendo, además de los óxidos férricos, $CaCO_3$ y FeS en algunas especies. Las bacterias del Fe y Mn son microorganismos aerobios con una disponibilidad de Fe^{2+} limitada, por lo que actúan incrementando los procesos electroquímicos previos que generan el Fe^{2+} necesario para su vida. Destáquese a *Thiobacillus ferrooxidans* capaz de oxidar Fe^{2+} a Fe^{3+} en medio ácido.

Todos estos microorganismos oxidan Mn^{2+} a Mn^{4+} , especialmente cuando exista abundancia de Mn sobre el Fe del medio, estando favorecido su crecimiento por fenómenos paralelos de nitrificación. Además, ciertas bacterias son específicas del Mn (algunas *Pseudomonas*, *Metallogenium* e *Hyphomicrobium*) cuya actividad es más rápida en aguas con pH ácido.

Bacterias oxidantes del hidrógeno

Varias bacterias quimirotóxicas aerobias son capaces de crecer en presencia de hidrógeno molecular aunque pueden emplear otros sustratos oxidables. Este proceso lo realizan el género *Hydrogenomonas* y algunas *Pseudomonas* (*P. facilis* y *P. delafieldii*), oxidando el hidrógeno hacia H_2O , en un proceso favorecido con la presencia de NO_3^- y O_2 , y pH alcalino.

Bacterias sulfato reductoras

Bacterias autotóxicas anaerobias facultativas, resisten temporalmente la saturación del agua en O_2 . Existen dos rutas metabólicas de reducción bacteriana de sulfatos: reducción *asimilatoria* y *desasimilatoria*. La primera es compartida por muchas bacterias (aerobias y anaerobias facultativas) que emplean el S generado internamente. Así, *E. coli*, para lo que cuenta con enzimas como la sulfato reductasa y la sulfito reductasa que finalmente rinden S^{2-} y H_2S . No obstante, el proceso de más importancia en corrosión bacteria-

na es la reducción *desasimilatoria*, llevada a cabo por bacterias anaerobias estrictas como *Desulfotomaculum*, *Desulfovibrio* y *Clostridium nigrificans*. En los dos casos los S^{2-} liberados precipitan iones Fe^{2+} generando depósitos de FeS negro que, además, contienen $Fe(OH)_2$.

Con respecto al H_2S , su acumulación en la superficie del agua residual, en condiciones de mínima oxigenación, da lugar al desarrollo de bacterias rojas y verdes del azufre, que en presencia de luz vuelven a oxidar el H_2S nuevamente hacia sulfatos. La alternancia de un tipo y otro de bacterias da lugar a un ciclo del S típico en aguas residuales desoxigenadas marcando en ellas el balance de S^{2-} . Por otro lado, el consumo químico de oxígeno en la superficie de los tubérculos acarrea después el desarrollo de más bacterias reductoras oportunistas que actuarían sobre varios sustratos del medio. Como reacción derivada del proceso anterior, el H_2S formado promueve la reducción electroquímica del Fe^{3+} presente lo que supone la contracción del volumen de los tubérculos y un material más quebradizo y más atacable.

Resumiendo, las condiciones favorables para la corrosión por bacterias sulfato reductoras son: medio anaerobio, $pH = 5,5-8,5$, presencia de PO_4^{3-} , Fe^{2+} y otros sustratos orgánicos (lactatos, malatos..), presencia de H_2 y temperatura óptima de desarrollo entre 30 y 40 °C.

Bacterias del ciclo del nitrógeno

Diversas bacterias fijan N_2 atmosférico desde suelo, agua, y desde los sedimentos orgánicos de medios acuáticos degradados (incluso colectores de aguas residuales): así, especies de *Azotobacter* en medio aerobio. Por otro lado, otras bacterias pueden realizar la amonificación (conversión de compuestos nitrogenados en NH_3) incrementándose la velocidad del proceso con la presencia de proteínas (habitual en el agua residual) y siendo óptima a temperaturas entre 25 y 35 °C, pero no



Figura 8. Tubérculos típicos de corrosión bacteriana en tuberías de hierro.

deteniéndose ni incluso a 0 °C. El amonio del agua residual es fuente de nitrógeno para las nitrosobacterias, que producen NO_2^- (*nitritación*) posteriormente oxidados a NO_3^- por las nitrobacterias (*nitratación*): sin embargo, elevados contenidos de NH_3 en el agua residual pueden inhibir la “nitratación”. Bacterias típicas en nitrificación son *Nitrosomonas* y *Nitrosococcus* (nitritación) y *Nitrobacter* y *Arthro-bacter* (nitratación).

En medios anaerobios ricos en materia orgánica se produce el proceso inverso a la nitrificación o “desnitrificación”, consistente en la reducción de NO_3^- a NO_2^- y de éstos a óxidos de nitrógeno y N_2 . Este proceso es llevado a cabo por numerosas bacterias anaerobias facultativas, que lo utilizan como “solución adaptativa” ante episodios de carencia de oxígeno. Finalmente, la amonificación de nitratos, o generación de NH_3 a partir de NO_3^- , es desarrollado por especies bacterianas de los géneros *Clostridium* y *Bacillus*, y por cepas de *E. coli*.

Ubicación de los agentes corrosivos y agresivos en los saneamientos

Los compuestos agresivos y corrosivos en los saneamientos no sólo están en el agua residual: ha de extenderse el concepto a todo

el entorno que la rodea y tanto en la parte de vehiculación de aguas (saneamiento) como en la de depuración (EDAR).

Siguiendo la línea de proceso, en una EDAR, las limpiezas y mantenimientos periódicos de elementos de elevación de aguas, las purgas de elementos de desengrasado-desarenado, purgas de decantación primaria o, en su caso, las aguas procedentes de secado o centrifugado de fangos secundarios e, incluso, las generadas en lavados y limpiezas periódicos de elementos de la EDAR tendrán potencial corrosivo, aunque se reconduzcan internamente al propio proceso depurador. Los restos de productos químicos de tratamiento diluidos y, si bien deben ser gestionados como *residuos peligrosos* por un gestor autorizado, podrían en situaciones de emergencia o de accidente llegar a proceso en la EDAR y constituirse como otros potenciales focos agresivos y corrosivos (por ejemplo, figura 9).

Supóngase que desde un agua residual se emitan compuestos volátiles, bien por encontrarse en origen en ella, o bien por generarse a través de los mecanismos químicos y microbiológicos que hemos reseñado en los apartados anteriores es muy evidente. Como ejemplo, los bencenos o clorofor-mo de un agua residual pueden incorporarse parcialmente a la fase gaseosa en equilibrio con la fase

líquida a lo largo de un colector que transporte estas aguas residuales en función de varias variables: temperatura, volatilidad, presiones parciales de los componentes, reacciones químicas que puedan experimentar los compuestos, etc. En todo caso una cierta fracción de estos compuestos estará en la atmósfera de los colectores de aguas residuales, y también en el ambiente de cualquier EDAR a la que accedan. Y desde aquí podrán, en mayor o menor medida, llevar a cabo su actividad corrosiva y agresiva en los diversos materiales e instalaciones en contacto con estas atmósferas.

Desde otra óptica, los gases y volátiles que química o microbiológicamente se generan en un agua residual, sin intervención del ser humano, como por ejemplo, el H_2S , mercaptanos o los compuestos aminados, podrán abandonar muy fácilmente la fase líquida y se instalarán preferentemente en la atmósfera en contacto con aquella, atacando redes de colectores así como elementos de llegada y de proceso de las aguas residuales en las EDARs (figura 9).

De lo dicho ya se identifican dos nichos de localización de importantes cantidades de agentes agresivos: el agua residual (*fase líquida*) bien en origen o la procedente de reboses y procesos internos de las EDARs, y los gases y atmósferas en contacto con estas aguas residuales (*fase gaseosa*). Para completar la panorámica, han de tenerse en cuenta los resi-

duos sólidos generados en una EDAR, así como en los colectores de aguas residuales.

Con respecto a los colectores de aguas residuales nos referimos a compuestos que, en función del trazado de colectores, por zonas de baja pendiente, fondos de saco, mínima velocidad de flujo, etc., se van acumulando en el fondo y paredes de los colectores. Englobados en estos sólidos existen compuestos con capacidad de agredir química o microbiológicamente materiales. Aquí también han de recordarse los pozos de sólidos existentes en elementos accesorios en colectores, como pueden ser bombeos y elevaciones de aguas, o asimismo los sistemas de purgas y de pretratamiento con que cuentan los tanques de tormenta y almacenamientos temporales de aguas residuales instalados en las redes de colectores, sin olvidar los aliviaderos de aguas para casos de emergencia en las redes de colectores que al no funcionar más que eventualmente suelen acumular gran cantidad de restos sólidos.

En las EDARs, los residuos y subproductos agresivos son porcentualmente más importantes: sólidos gruesos, retirados antes de la elevación inicial de aguas a la EDAR; sólidos retirados en desarenado; sólidos retirados en decantación primaria, con o sin adición de reactivos químicos y fangos retirados y no recirculados

de decantación secundaria. En realidad los sólidos de los pozos de gruesos, desarenado y desengrasado, se retiran del agua residual directamente y no suelen ser después sometidos a ningún tratamiento, siendo gestionados por un gestor autorizado al efecto. Así, su agresividad tiene efectos limitados, salvo accidente o evacuación indeseada, circunscribiéndose a los depósitos temporales de almacenamiento y las inmediaciones de los mismos.

Con respecto a los fangos primarios y secundarios, normalmente se envían a proceso interno, en lo que constituye la *línea de fangos* de cualquier depuradora, siendo deshidratados y eventualmente secados y, finalmente, gestionados como residuos asimilados a urbanos, o incluso enviados a aprovechamiento agrícola, compostaje, o bien siendo sometidos a digestión anaerobia para su aprovechamiento energético vía cogenerativa. En estos casos, los elementos de deshidratación y secado de fangos, frescos o digeridos, o instalaciones de almacenamiento temporal, sí suelen generar ambientes gaseosos y atmósferas con alto poder agresivo y corrosivo (además de odorífero).

Resumiendo, los agentes agresivos y corrosivos para los sistemas de saneamiento pueden encontrarse en los tres nichos que conforman el sistema (figura 10): (a) *en fase líquida* como aguas residuales; (b) *en fase gaseosa* como gases que escapan de la fase líquida; (c) *en fase sólida* como los residuos separados del agua residual, bien a través de su depuración, bien a través de simples fenómenos de decantación no forzada.

Costes asociados de los fenómenos corrosivos y agresivos

Son de dos tipos: no económicos y económicos. De los primeros podemos fijarnos en:

- Roturas, fisuras, fracturas y deterioros prematuros en colectores y equipos;



Figura 9. Alteración general de la arqueta de recogida de agua depurada en un tanque de oxidación total tras 3 años de servicio.

también en los propios elementos y equipos de los laboratorios de proceso de las EDARs.

- Evacuación indeseada al medio ambiente de efluentes sin depurar, tanto aguas residuales como gases y atmósferas nocivas. De producirse en zonas habitadas o en su proximidad, podría generar problemas sanitarios por la contaminación microbiana rica en vectores activos de diversas enfermedades contenidos en las aguas residuales.
- La salida al medio, especialmente urbano, de efluentes gaseosos también podría acarrear problemáticas ligadas a malos olores y atmósferas desagradables.
- La salida al freático de aguas residuales sin tratar, o directamente, al medio ambiente urbano o cercano al mismo, podría constituir un foco importante de contaminación ambiental indeseable de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos.
- Generación de problemas de movilidad urbana e incomodidad ligada a los episodios de reparación de instalaciones deterioradas: cortes de tráfico, ruidos por maquinaria pesada, molestias por gases de combustión de maquinaria (por ejemplo, de corte o para generación eléctrica autónoma) e, incluso, la restricción de acceso a la propia vivienda a los ciudadanos en función de la localización concreta del problema a resolver.
- Por último, la percepción social del ciudadano de prestar poca atención a la cuestión ambiental ligada a la recogida y depuración de las aguas residuales en su ciudad.

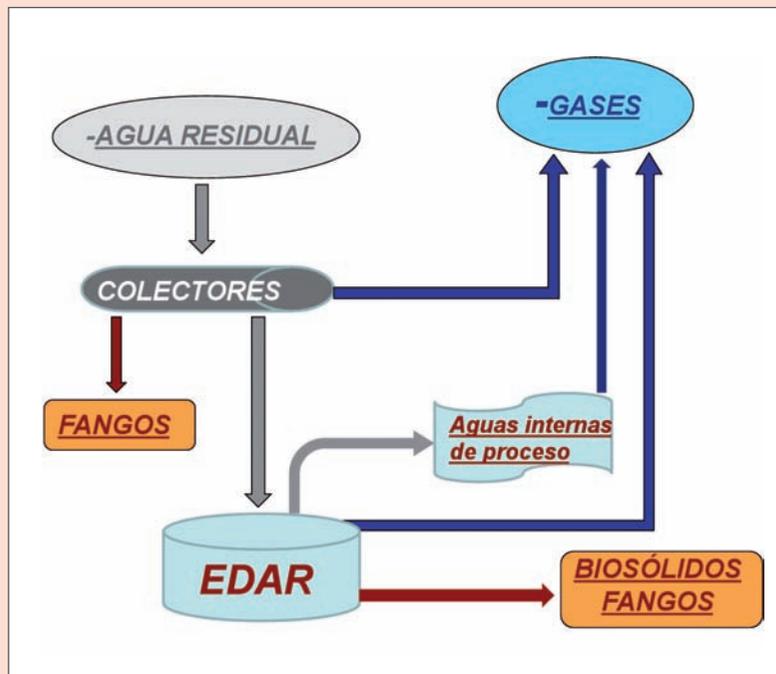


Figura 10. Localización de los agentes agresivos y corrosivos en un saneamiento: aguas residuales, gases, y fangos de depuración.

Para finalizar este artículo, y aunque los costes económicos globales son un aspecto cuyo resultado final estará en función de los parámetros de partida considerados, estimaciones del sector evalúan los costes derivados de los fenómenos agresivos y corrosivos, y que afectan a reposición total o parcial de materiales y equipos de saneamientos y depuradoras, entre el 0,1% y más del 1% sobre el PIB de un país industrializado. En el caso de España, la cantidad podría rondar los 10.000 M€ al año, cantidad ciertamente considerable y que plantea la necesidad imperiosa de implantar políticas prácticas que minimicen estos problemas y que puedan ahorrar una cantidad importante en el desarrollo de las actividades de saneamiento y depuración que pueda repercutir favorablemente sobre el bolsillo del ciudadano, que a fin de cuentas es quien soporta al final todo lo concerniente al ciclo integral del agua.

Bibliografía

Degrémont, 1989. *Manual Técnico del agua - Mémento technique de l'eau*. París.

Han, H.H. y Klute, R. 1990. *Chemical water and wastewater treatment*. Ed. Springer-Verlag, Darmstad.

Levine, I. N. 1991. *Físico Química*. 3.ª ed, español. Ed. McGraw-Hill/ Interamericana de España, Madrid.

Marín Galvín, R. 1995. *Análisis de Aguas y Ensayos de Tratamiento: Principios y Aplicaciones*. Ed. GPE, S.A. Barcelona.

Marín Galvín, R. 2003. *Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos. Tratamiento y Control de Calidad de Aguas*. Ed. Díaz de Santos. Madrid.

Rodríguez Mellado, J. y Marín Galvín, R. 1999. *Fisicoquímica de Aguas*. Ed. Díaz de Santos.

Tchobanogbus, G. y Schroeder, E. D. 1985. *Water Quality*. Ed. Adisson- Wesley Pub. Co. Reading (Mass.).

Agradecimientos

Al Grupo de Trabajo de Inspección de Vertidos y Laboratorio de la Comisión V de AEAS, por la disponibilidad de parte del material aportado en el trabajo.