

Resumen

En este trabajo se busca plasmar en cifras el balance de masas asociado al ciclo integral urbano del agua en la ciudad de Córdoba con datos obtenidos a lo largo del último trienio (2004-2007). En resumen, por cada 1.000 l de agua bruta que se captan, se producían en la ETAP 954 l de agua de consumo, se consumen por la ciudad 811 l y se generan 608 l de agua residual urbana (doméstica e industrial). Sumando la contribución de aguas naturales y de aguas no suministradas por el gestor del abastecimiento (Emacsa), llegaron a la EDAR 1.026 l, los cuales se transformaban en 1.015 l de agua depurada vertida al río Guadalquivir y en 11 l de biosólidos aptos para su uso agrícola o en compostaje.

Palabras clave:

ETAP, decantación, filtración, purgas de decantación, aguas de lavado de filtros, EDAR, depuración biológica aerobia, biosólidos.

Abstract

The number of the integrated water cycle at Córdoba city along the 2004-2007 period

The subject of this paper is to show the situation in Córdoba along the 2004-07 period. Our results indicated that every 1,000 l of natural non-treated water are transformed by treatment in 954 l of drinking water, being effectively used by the people 811 l. Moreover, the city generated 608 l of urban wastewater (domestic and industrial). Finally, the generation of total wastewater by the community was 1,026 l, which corresponded to urban wastewater, as well as to the natural and other water emanating from flows non-directly controlled. All this wastewater influent to the wastewater treatment plant (WWTP) of the city was transformed in 1,015 l of treated wastewater, which was disposed to natural aquatic medium (Guadalquivir river). By summarizing, in the WWTP the treatment produced 11 l of biosolids whose could be employed by agricultural or composting uses.

Keywords:

Drinking water plant, settling, filtration, settling sewage, filtration sewage, wastewater treatment plant, biological aerobic treatment, biosolids.

El ciclo integral del agua en Córdoba durante el trienio (2004-2007) en cifras

Por: **Rafael Marín Galvín**, jefe de Control de Calidad, Calidad y Medio Ambiente de Emacsa

Empresa Municipal de Aguas de Córdoba, S.A. (Emacsa)

C/ De los Plateros, 1

14006 Córdoba

E-mail: rmargal@emacsa.es

1. Introducción

El conocimiento lo más ajustado posible a la realidad del ciclo integral de cualquier colectividad (agua disponible, agua potable producida, agua consumida, agua perdida en red, agua depurada, subproductos generados...) puede representar una ayuda imprescindible a fin de optimizar y gestionar de una forma eficaz las reservas con las que en cada momento se cuentan. Teniendo en cuenta que, desafortunadamente, los recursos hídricos existentes cada vez parecen ser más escasos, nos abocamos a un cálculo exquisito del balance del ciclo integral del agua en cada ciudad.

El contar con datos fiables sobre los flujos de agua y subproductos implicados, tanto en la línea de consumo de agua (línea de aguas blancas) como en la del vertido de aguas ya usadas (línea de aguas negras), hará más eficientes nuestros abastecimientos, tanto técnica como ambientalmente. Con esta

filosofía se ha abordado el estudio del balance de masas asociado a un ciclo integral concreto, el de la ciudad de Córdoba, como aproximación a este interesante tema.

Como introducción al asunto ha de indicarse que cualquier proceso de descontaminación o detoxificación llevado a cabo por el ser humano, bien se trate de agua, aire o suelo, comporta un efecto secundario más o menos acusado de generación, así como subproductos potencialmente nocivos o problemáticos a la hora de su ulterior gestión. No vale, simplemente, trasladar los contaminantes de ubicación. La globalización también alcanza, aparte de la economía, al medio ambiente.

Ello se debe a que las técnicas y sistemas rutinariamente aplicados por el hombre para limpiar un sustrato se basan, en su gran mayoría, en la estrategia de concentrar en volúmenes cada vez más reducidos los contaminantes o sustancias no deseables que en origen tiene el sustrato considerado. La

disgregación total de un subproducto en moléculas simples, o incluso en átomos, no suele ser un proceso viable en la práctica, por lo menos en la actualidad.

Aplicando el razonamiento anterior al ciclo integral del agua, la primera parte del mismo comprende la potabilización del agua bruta disponible. Este proceso implica la generación de subproductos que condensan todos los componentes, fisicoquímicos y microbiológicos (en general, biológicos) que restringirían o incluso harían totalmente inviable el empleo de esa agua, tanto desde la óptica de la legislación aplicable en cada momento como desde el aspecto de la propia seguridad sanitaria y toxicológica para el ser humano.

Una estación de tratamiento de aguas potables (ETAP) en la que habitualmente se aplican procesos unitarios de oxidación, decantación-sedimentación y filtración o adsorción, también es una máquina de producir subproductos de desecho. Piénsese en que todo el fango generado desde el inicio del tratamiento en la ETAP hasta el proceso de decantación, los denominados fangos de decantación, debe ser retirado periódicamente de los decantadores a fin de que el proceso no se colmate y deje de discurrir adecuadamente. Téngase en cuenta que estamos aplicando frecuencias de retirada de fangos excedentarios de decantación del orden de minutos o incluso menos, a lo largo de 24 horas al día, en instalaciones de potabilización de tamaño medio en adelante. Las características de los fangos (sequedad, materia orgánica, metales, compuestos orgánicos...) lógicamente variarán en función de las características del agua a tratar y de la secuencia de tratamiento, reactivos químicos y aditivos empleados, y dosis concretas aplicadas.

Así mismo, el proceso de filtración de aguas ya decantadas, bien sola (vía arena silíceas) bien paralelamente o en conjunto con la adsorción vía carbón activo granular (u

otros medios), es otra fuente no desdéniable de subproductos ligados a la producción de aguas de lavado de filtros, ricas en diversas materias y no totalmente eliminadas en la fase precedente de la decantación.

Como resumen de lo comentado hasta ahora, la potabilización de aguas de consumo es una actividad productora de desechos, los cuales deben ser correctamente gestionados para minimizar su afeción sobre el medio ambiente, tanto urbano como en general. Cuestión de sumo interés a renglón seguido será el entrar a valorar las posibilidades de gestión de estos desechos en función del subproducto concreto: depuración vía saneamiento en depuradora municipal (EDAR) o tratamiento de compactación en la propia ETAP.

Dicho lo anterior, estamos ya en situación de abordar la segunda parte del ciclo integral del agua en nuestras ciudades, el cual comprendería la depuración de esas aguas ya usadas, cualquiera que sea su uso, y que en función de éste se convierten en aguas residuales urbanas. Éstas se encuentran habitualmente compuestas por aguas residuales puramente domésticas (desechos fisiológicos humanos y productos de limpieza personal y doméstica) y aguas residuales industriales, más o menos depuradas por el propio industrial antes de su vertido a la red general de saneamiento y cuyas características variarán extraordinariamente en función del origen industrial concreto.

Al tema de vertidos domésticos y aguas residuales industriales probablemente se le haya prestado históricamente más atención, dado que la generación de fangos o lodos de depuración (biosólidos) en realidad suele ser la parte final y la más perceptible por el ciudadano de todo el complejo proceso que comporta el abastecimiento y el saneamiento de aguas a una población.

La depuración de nuestras aguas residuales urbanas en EDAR municipales discurre mayoritariamente mediante procesos de depuración

biológica aerobia que propician la producción de fangos de depuración con una componente orgánica sustancial (mayoritaria) frente a los desechos generados en las ETAP, que tienen una connotación fundamentalmente inorgánica debido a que los procesos allí empleados suelen utilizar productos químicos (por ejemplo, sales de aluminio, floculantes orgánicos, cloro, permanganato potásico, carbón activo).

Referido someramente lo que supone el ciclo integral del agua en una colectividad, el objetivo que se persigue con este estudio es plantear la realidad de que el ciclo integral del agua en nuestras ciudades implica la producción en todas sus fases (potabilización de aguas blancas y depuración de aguas negras) de desechos más o menos contaminantes que deben tener una respuesta adecuada por parte de la colectividad. En realidad nos estamos refiriendo a un balance de masas que reubica sustancias y compuestos presentes en un agua, tanto si ésta se potabiliza para consumo humano como si se depura para vertido a cauce público o incluso para reutilización posterior.

En este trabajo se pasará revista al caso concreto de la ciudad de Córdoba, estudiando las características de las purgas de decantación y aguas de lavado de filtros de la ETAP de Villa Azul que abastece a la ciudad, y las características de los lodos de depuración o biosólidos generados en la EDAR de La Golondrina, la cual acomete la depuración de todas las aguas residuales que evacua la ciudad.

Los datos elaborados comprenden el trienio que va desde junio de 2004 a mayo de 2007. Abarcan la situación experimentada en el abastecimiento a Córdoba durante los últimos tres años con conclusiones pertinentes en orden al establecimiento de un balance de masas (agua –blanca y negra– y sólidos –subproductos y biosólidos–) asociado al ciclo integral del agua en la ciudad de Córdoba, como posible modelo para otras situaciones similares.



Figura 1. Presa del embalse de Guadalmellato.

2. Materiales y métodos

Las técnicas aplicadas para caracterización de las aguas residuales fueron las habituales para este tipo de estudios. Así, los S_{SED} se cuantificaron mediante el cono de Inhoff; los S_{SUS} se determinaron tras filtración y posterior secado del residuo a 108 °C; la DBO_5 , mediante el método del Oxitop con el empleo inhibidor de nitrificación (alil-tiourea); y la DQO total, mediante la técnica del dicromato potásico. Nitrógeno Kjeldahl y fósforo total se midieron tras llevar a cabo sendas digestiones en placa (el segundo, usando persulfato) y posteriores medidas colorimétricas, mientras los nitratos se midieron con electrodo selectivo. Este procedimiento se aplicó tanto a aguas como a biosólidos.

La sequedad de los biosólidos se obtuvo sometiendo el fango a 105-108 °C de temperatura en estufa hasta peso constante, y la materia orgánica calcinando el fango ya seco en mufla a 550 °C, también hasta peso constante.

Por último, la determinación de metales totales, tanto en biosólidos

como en aguas, se llevó a cabo mediante la técnica ICP. En el caso del agua, después de digestión ácida de 20 ml de muestra (agua prepotable, aguas de lavado, purgas de decantación o agua residual) a las que se añadían 3 ml de HCl y 1 ml de HNO_3 , manteniendo en recipiente cerrado de teflón durante 2 h a 180 °C. Y en el caso de los biosólidos, mediante digestión de 1 g de fango ya seco, siguiendo el procedimiento descrito para el agua residual.

3. Resultados y discusión



Figura 2. Vista general de la ETAP de Villa Azul.

3.1. El ciclo integral del agua en la ciudad de Córdoba

Como preámbulo al tema, indíquese que el municipio de Córdoba (325.000 habitantes) lleva a cabo la gestión de su ciclo integral del agua a través de una entidad totalmente pública y municipal, la Empresa Municipal de Aguas de Córdoba (Emacsa).

El ciclo se inicia, lógicamente, con la captación de agua bruta prepotable para el abastecimiento que se realiza desde el embalse de Guadalmellato (147 hm³), situado a unos 25 km de la ciudad. El vaso del embalse se ubica en terrenos graníticos de la cara sur de Sierra Morena, lo que garantiza una muy buena calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, la cual presenta históricamente un contenido salino bajo-medio (220-260 $\mu S/cm$ de valor medio de conductividad) (Figura 1).

A fin de asegurar la disponibilidad de agua para el abastecimiento, se cuenta como fuente de captación de emergencia con el embalse de San Rafael de Navallana (156 hm³), ubicado aguas abajo del primero y a unos 2 km del río Guadalquivir, lo que le permite actuar regulando su capacidad de almacenamiento en función de los aportes que puede recibir tanto del embalse de Guadalmellato como del propio río Guadalquivir, incluso desembalsando a este último en función de cada situación hidrológica concreta y, por tanto, ayudando a mantener



Figura 3. Vista general de la EDAR de La Golondrina.



Figura 4. Río Guadalquivir tras el vertido del agua depurada de Córdoba.

más o menos constante el caudal circulante de este río.

Siguiendo el flujo desde el embalse, el agua bruta prepotable se vehicula hacia la ETAP de Villa Azul a través de dos tuberías (una rodada y otra en carga). La media diaria de agua bruta tratada en el período de junio de 2004 a mayo de 2007 ha sido de 79.419 m³. Una vez en la ETAP (Figura 2), el agua se somete al proceso de potabilización y se distribuye a la ciudad. La red de suministro cuenta con más de 1.100 km de tuberías de distribución, cifrándose la media de producción de agua en la ETAP (agua que tal cual se produce se suministra a la red de distribución) en los últimos tres años en 75.754 m³ al día. La red de distribución comprende el 98% del término municipal y cuenta con varios depósitos de distribución y almacenamiento de diferente capacidad para garantizar la seguridad en el suministro a la población.

Una vez usada el agua de consumo, tanto por parte de los usuarios domésticos como de los usuarios industriales o comerciales de la ciudad, se convierte en agua residual urbana alcanzando un caudal medio de evacuación que accede a la EDAR de La Golondrina de 81.447 m³ al día (Figura 3). En esta cantidad se computan, además, los caudales naturales más o menos degradados que están integrados directamente en la red de saneamiento y aquellos

caudales empleados por diferentes usuarios (fundamentalmente industrias) del abastecimiento y no suministrados desde la red general.

En todo caso, el agua residual bruta está integrada por, aproximadamente, un 15% de aguas residuales de origen industrial, siendo el resto aguas residuales domésticas y naturales, como se indicó más arriba. Las aguas residuales industriales proceden mayoritariamente de industrias de manufacturas del cobre, muchas pequeñas-medianas industrias de joyería y platería, una papelera, una vidriera, una fábrica de levaduras, varias industrias de transformados alimentarios, aceiteras y centros de fabricación y envasado de bebidas alcohólicas y no alcohólicas.

Toda el agua residual urbana de la ciudad se conduce a través de la red de colectores de saneamiento (más de 1.400 km) hacia la EDAR municipal de La Golondrina, en la que mediante un proceso biológico aerobio (fangos activos) se procede a la depuración de los efluentes para su vertido final al río Guadalquivir, cumpliendo con los estándares de depuración aplicables (Figura 4).

Con ello se ha cerrado el ciclo integral del agua en el municipio de Córdoba, de forma que se puede hablar de que toda el agua consumida por la ciudad (como se demostrará más adelante) es finalmente revertida al medio natural, en unas condi-

ciones de mínima agresión ambiental para aquél y con posibilidad de su posterior aprovechamiento para todos los usuarios ubicados aguas abajo de la ciudad de Córdoba.

3.2. Generación y caracterización de subproductos de la ETAP de Villa Azul

La ETAP de Villa Azul cuenta con un tratamiento completo integrado por varios procesos unitarios:

- Dosificación de carbón activo en polvo para: eliminación de microcontaminantes de síntesis (especialmente fitosanitarios potencialmente presentes en el agua bruta).
- Aireación-ozonización, llevada a cabo en 3 cámaras de 500 m³ de capacidad unitaria. El ozono se produce en la propia planta.
- Preoxidación: cloro, permanganato potásico, dióxido de cloro.
- Ajuste de pH: lechada de cal.
- Dosificación de coagulante: polícloruro de aluminio o sulfato de aluminio.
- Decantación a través de cuatro pulsators lamelares de 1.875 m³/hora de capacidad de tratamiento.
- Filtración: 30 filtros rápidos de arena con un total de 1.048 m² de superficie total de filtración efectiva.
- Ajuste final de pH: agua de cal.

El proceso, que discurre en continuo, se ajusta como en cualquier

Tabla 1

Parámetros	Media	Máximo	Minimo
pH	7,00	7,34	6,50
Sólidos sedimentables	234	420	100
Sólidos en suspensión	555	1.123	215
DBO ₅	13	25	4
DQO	424	1.133	110
N-Kjeldahl	12,5	24	6,1
P-total	4,5	13	1,0
Nitratos	4,3	11,5	1,5

Tabla 1. Purgas de decantación de la ETAP de Villa Azul en el periodo 2004-2007. Nota: Excepto pH (en unidades de pH) y sólidos sedimentables (ml/l), el resto de parámetros en mg/l.

ETAP a lo demandado en cada momento por las características del agua bruta, en función del objetivo de conseguir la mejor calidad posible del agua tratada.

Sin entrar en más pormenores, existen dos fuentes mayoritarias de producción en continuo de subproductos en la ETAP:

- Las purgas periódicas de decantación, que se operan adaptándolas en cada momento a lo requerido por la explotación. El caudal medio derivado de esta componente a lo largo del trienio estudiado ha sido del 1,9% sobre caudal tratado (es decir, sobre el caudal de entrada a planta).
- Las aguas de lavado de filtros, siendo el parámetro determinante que ahora marca las características de éstas la carrera filtrante, o tiempo transcurrido entre cada dos procesos inmediatos de lavado de un filtro. El valor medio de la carrera filtrante de las unidades de filtración en la ETAP se cifra en unas 48 horas, representando el caudal medio derivado de esta segunda componente entre junio de 2004 y mayo de 2007 del 2,7% sobre caudal tratado.

Tanto la generación práctica como las características de aguas de lavado de filtros y de purgas de decantación van a estar marcadas por el tratamiento concreto (calidad del agua bruta, línea de proceso segui-

da, reactivos químicos empleados y dosis de cada reactivo) aplicado en cada momento. Por último, indicar que ambos tipos de efluentes de la ETAP se vierten directamente al saneamiento general de la ciudad no sufriendo ningún tipo de tratamiento en la planta.

3.2.1. Purgas de decantación

En la **Tabla 1** se recogen los datos medios, máximos y mínimos de las características investigadas en las purgas de decantación de la ETAP de Villa Azul de los últimos tres años (2004-2007).

A pesar de la lógica fluctuación en los resultados presentados, los valores medios presentan una relación entre DQO y DBO₅ muy alta, del orden de unas 30 veces la de un agua residual doméstica, mientras que el contenido en sólidos en suspensión (555 mg/l) implicaba que cada m³ de agua de purgas contenía unos 0,555 kg de materias sólidas.

Considerando el caudal medio de vertido de las purgas de decantación (1.527 m³ al día), la carga contaminante aportada por este subproducto de la ETAP al agua residual de la ciudad sería de:

$$1.527 \text{ m}^3/\text{día} \times 0,555 \text{ kg/m}^3 \text{ de } S_{\text{SUS}} = 847 \text{ kg/día}$$

Si estimamos que la carga orgánica puede ser la media ponderada entre las demandas bioquímica y química del efluente, tendríamos:

$$1.527 \text{ m}^3/\text{día} \times 0,219 \text{ kg/m}^3 = 334 \text{ kg/día}$$

Así mismo, el contenido en metales residuales del agua de las purgas podría constituir un riesgo en el efluente residual integrado de la ciudad por su posterior potencial afección sobre la depuración biológica del agua residual llevada a cabo en la EDAR La Golondrina. En este sentido, la **Tabla 2** presenta los valores medios de 20 metales investigados en los efluentes de la ETAP. Estos metales, excepto Ca, Mg, Na y K, son los limitados en la Ordenanza Municipal de Vertidos Industriales de Córdoba, información que también se recoge en la referida **Tabla 2**.

Fijándonos en el contenido en metales pesados de las purgas de decantación, el metal mayoritario fue el aluminio con 3,50 mg/l (10,5% sobre el total de metales), es decir, 0,0035 kg por cada m³ de agua de purga, siendo el contenido total en metales de 33,11 mg/l o, lo que es lo mismo, 0,033 kg por m³. En todo caso, los metales mayoritarios del efluente fueron los que lo son en el agua dulce continental

Tabla 2

Parámetro	Purgas de decantación	Lavado de filtros	Ordenanza
Hierro	1,00	0,17	10,0
Manganeso	0,26	0,01	2,0
Arsénico	< 0,01	< 0,01	1,0
Plomo	< 0,01	< 0,01	1,5
Selenio	0,018	0,013	1,0
Cobre	< 0,1	< 0,1	6,0
Zinc	< 0,1	< 0,1	10,0
Níquel	< 0,01	< 0,01	4,0
Cadmio	< 0,001	< 0,001	0,7
Mercurio	0,022	0,015	0,1
Cromo	0,001	< 0,001	5,0
Aluminio	3,50	1,02	10,0
Bario	< 0,1	< 0,1	12,0
Boro	0,09	0,06	2,0
Estaño	0,007	0,005	2,0
Plata	< 0,001	< 0,001	0,5
Ca+Mg+	28,0	26,1	-
Na+K			
Total metales (móx)	33,11	27,61	-

Tabla 2. Metales en purgas de decantación y en aguas de lavado de filtros de la ETAP de Villa Azul. Nota: Metales mg/l.

Tabla 3

Parámetros	Media	Máximo	Mínimo
pH	7,20	7,40	7,10
Sólidos sedimentables	5	12	2
Sólidos en suspensión	59	106	29
DBO ₅	9	14	5
DQO	48	100	25
N-Kjeldahl	2,0	2,7	1,0
P-total	5,4	10	0,3
Nitratos	1,7	5,3	0,4

Tabla 3. Aguas del lavado de filtros en la ETAP de Villa Azul en el periodo 2004-2007. Nota: Excepto pH (en unidades de pH) y sólidos sedimentables (ml/l), el resto de parámetros en mg/l.

(y específicamente en el agua bruta del embalse de Guadalmellato empleada para potabilización y distribuida a la ciudad), es decir, Ca, Mg, Na y K, que supusieron un 84,6% del total, significando a su vez un 15,4% sobre el total, del

resto de metales pesados presentes en las purgas de decantación investigadas.

A destacar, asimismo, la presencia de Fe con 1,00 mg/l (3,0% sobre el total de metales) y Mn con 0,26 mg/l (0,8% sobre total): la procedencia

del aluminio es evidente, utilización habitual de coagulantes aluminosos en la potabilizadora, mientras que la del Fe y del Mn tiene su origen en la presencia mayoritaria de estos metales como microcontaminantes (alrededor de 0,2 mg/l como media en ambos casos) en el agua bruta prepotable empleada en la ETAP.

Comparando los datos reales del agua de las purgas de decantación con los límites de la Ordenanza de Vertidos de Córdoba, puesto que esta agua debe cumplir como cualquier efluente industrial de la ciudad, se observa que este tipo de agua residual podría evacuarse directamente a la red de saneamiento de la misma por ser sus características acordes a lo establecido, y sin requerir en principio ningún tipo de tratamiento depurador adicional, práctica que como ya se ha dicho es la actualmente seguida. Esta circunstancia no sería importante en el caso de Córdoba, al ser Emacsa el gestor tanto del suministro de agua de consumo como del saneamiento. No obstante, sí podría plantear problemas administrativos y de otra índole cuando el gestor del saneamiento fuera distinto al gestor del suministro de agua potable.

Además, con los datos aportados puede inferirse que la carga contaminante aportada por las purgas de decantación al agua residual integrada de la ciudad (**Tabla 4**) sería de un 2,9% de los sólidos en suspensión y sólo del 0,8% de la carga biodegradable considerada ésta como la media aritmética de las demandas bioquímica y química de oxígeno. Se deduce, por tanto, una influencia limitada pero apreciable de este efluente sobre el total del agua residual generada por la colectividad

3.2.2. Aguas de lavado de filtros

Con relación al segundo efluente generado como subproducto en el proceso de potabilización, la **Tabla 3** recoge los datos medios, máximos y mínimos de las características investigadas en las aguas de lavado de

Tabla 4

Aportación	Caudal m ³ /día	Kg de sólidos en suspensión	Kg de carga degradable*
Purgas decantación	1.527	847	334
Lavado filtros	2.138	126	62
Total (purgas+lavado)	3.665	973	396
Agua residual ciudad	81.447	29.694	40.610
% Purgas secantación sobre agua residual	1,9	2,9	0,8
% Lavado filtros sobre agua residual	2,6	0,4	0,2
% (purgas+lavado) sobre agua residual	4,5	3,3	1,0

Tabla 4. Aportación de carga derivada de la potabilización al conjunto del agua residual de la ciudad durante el periodo 2004-2007. Nota: * = carga degradable, media aritmética entre DBO₅ y DQO.

filtros de la ETAP de Villa Azul de los últimos años (2004-2007).

También, a pesar de la lógica fluctuación en los resultados presentados, ha de incidirse en que la relación entre DQO y DBO₅, si bien alta, es sensiblemente más baja que en el caso de purgas de lavado y siempre muy superior a la de un agua residual doméstica. Asimismo, el contenido en sólidos en suspensión (59 mg/l) implicaba que cada m³ de agua de purgas contenía unos 0,059 kg de materia sólida en suspensión. Es evidente que existe una mejora notable de calidad entre el agua de lavado de filtros y las purgas de decantación, lo cual es lógico puesto que las materias retiradas en filtración siempre serán las residuales procedentes de la decantación.

Haciendo cálculos similares a los llevados a cabo en el caso anterior (se computa una media de 2.138 m³ de generación de agua de lavado de filtros al día), puede calcularse la carga contaminante aportada por este subproducto de la ETAP al agua residual de la ciudad, que sería de:

$$2.138 \text{ m}^3/\text{día} \times 0,059 \text{ kg/m}^3 \text{ de } S_{\text{SUS}} = 126 \text{ kg/día}$$

Si consideramos ahora la carga orgánica como media ponderada entre las demanda bioquímica y química del efluente, tendríamos:

$$2.138 \text{ m}^3/\text{día} \times 0,029 \text{ kg/m}^3 = 62 \text{ kg/día}$$

El contenido en metales residuales del agua de lavado de filtros también podría constituir potencialmente un riesgo en el efluente a la hora de su ingreso en la red de saneamiento de la ciudad por su posterior potencial afectación sobre la depuración biológica del agua residual integrada del municipio en la EDAR. Así pues, de la **Tabla 2** antes referida podemos deducir que el contenido en metales del agua de lavado de filtros es sensiblemente más bajo que el de purgas, lo cual es lógico habida cuenta de la mayor limpieza del agua de lavado de filtros frente a la de las purgas de decantación (como se indicó más arriba). Además, los metales pesados supusieron ahora sólo el 5,5% sobre el total de metales, de los cuales los alcalinos y alcalinotérreos incrementaron paralelamente su porcentaje hasta el 94,5%.

También ahora el metal pesado mayoritario fue el aluminio, con 1,02 mg/l (es decir, 0,001 kg por cada m³ de agua de purga y 3,7% sobre total de metales), seguido de Fe (0,17 mg/l y 0,6% sobre total), siendo finalmente el contenido total en metales de 27,61 mg/l o, lo que es lo mismo, 0,028 kg por m³. Como dato a valorar indíquese que, aunque en términos absolutos los contenidos en algunos metales pesados minoritarios (por ejemplo, Se, Hg...), éstos se redujeron con relación a los presentes

en las purgas de decantación. Por el contrario, incrementaron su porcentaje al reducirse el total de metales pesados mayoritarios (Al, Fe y Mn).

Comparando ahora los datos reales del agua de lavado de filtros con los límites de la Ordenanza de Vertidos de Córdoba, se continúa observando que este tipo de agua residual podría evacuarse directamente a la red de saneamiento de la ciudad por ser sus características acordes a lo establecido. Además, la buena calidad de esta agua posibilitaría su empleo para riego de jardines (tras someterla a una decantación adicional), uso actualmente valorado por el Ayuntamiento de Córdoba.

Como se refirió en el apartado anterior, el cálculo de la carga contaminante aportada por este efluente de potabilización al agua residual de la ciudad (**Tabla 4**) sería de un 0,4% de los sólidos en suspensión y del 0,2% de la carga biodegradable (media entre DBO₅ y DQO), con lo que el conjunto de todos los efluentes de la ETAP supondrían un 4,5% del caudal de agua influente a la EDAR, aportando un 3,3% del total de sólidos en suspensión y un 1,0% de la carga biodegradable al agua residual integrada de la ciudad de Córdoba.

3.3. Generación y caracterización de biosólidos generados en la EDAR de La Golondrina

La EDAR La Golondrina es una depuradora convencional que opera

mediante el proceso biológico aerobio de los fangos activos. Dispone de bombeo de agua en cabecera mediante tornillos de Arquímedes, pretratamiento (tamizado en dos niveles, desarenado y desengrasado), decantación primaria no forzada, tratamiento biológico equipado con selectores anaerobios previos a la aireación (24% sobre volumen total de las balsas de aireación), decantación secundaria y tratamiento de fangos.

Los fangos primarios (procedentes de la decantación primaria) se espesan mediante gravedad; los fangos secundarios (procedentes de la decantación secundaria posterior al tratamiento biológico), mediante flotación; y el conjunto de ambos se deshidrata con ayuda de polielectrolito en decantadores centrífugos. El caudal de diseño de la planta es de 108.000 m³/día. Esta EDAR cuenta con Autorización de Vertidos expedida por el Organismo de Cuenca con fecha del 4-7-2005.

La EDAR cumple habitualmente con los estándares de depuración exigibles que marcan valores límite de 25 mg/l de DBO₅, de 125 mg/l de DQO y de 35 mg/l de S_{SUS} para el agua ya depurada y que después es vertida al cauce público del río Guadalquivir.

El caudal medio tratado a lo largo del período estudiado fue de 81.447 m³/día, lo que supuso un 75% sobre la capacidad punta de depuración, siendo la carga media diaria que accedió a depuración de 29.694 kg de sólidos en suspensión y de 40.610 kg de carga orgánica biodegradable (media entre DBO₅ y DQO). Además, el agua residual influente a la EDAR presentaba un contenido medio de 50 mg/l de N-Kjeldahl y 8,6 mg/l de fósforo total, así como un contenido medio en metales totales de 2,80 mg/l.

La cantidad de fangos totales sin tratamiento, tanto primarios como secundarios eliminados en la EDAR, era de alrededor de un 1%, lo que en términos de caudal puede suponer unos 814 m³ al día, siendo por tanto el caudal de agua depura-

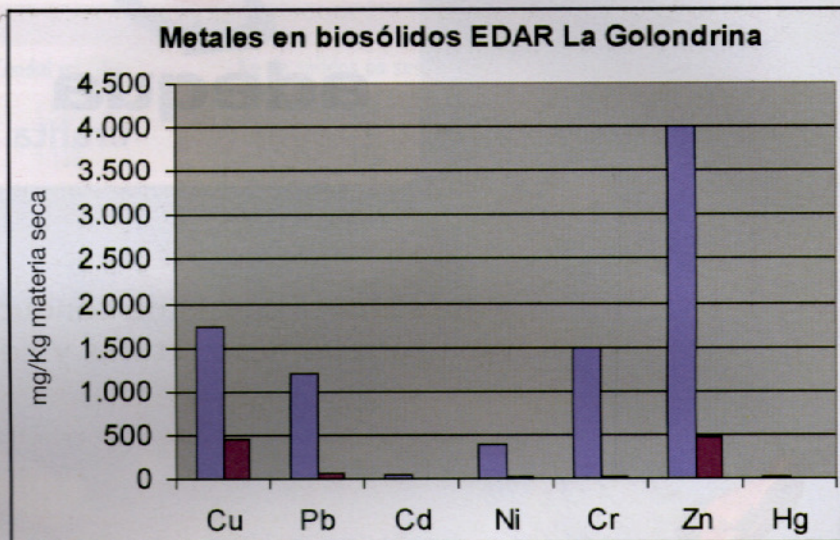


Figura 5. Metales pesados en biosólidos y su comparación con el RD sobre aprovechamiento agrícola de fangos de depuración.

Tabla 5

Parámetros	Cantidad
Sequedad %	21,9
Materia orgánica %	73,9
Nitrógeno %	7,1
Fósforo %	4,2
Cobre	463
Hierro	9.792
Manganeso	245
Plomo	59
Cadmio	2,3
Níquel	23
Cromo	29
Zinc	482
Mercurio	1,7
Arsénico	5,6
Selenio	5,0
Cobalto	2,1
Ca+Mg+Na+K	5,0
Total metales	11.115

Tabla 5. Características de los biosólidos generados en la EDAR La Golondrina en el periodo 2004-2007. Nota: Metales en mg/kg de materia seca.

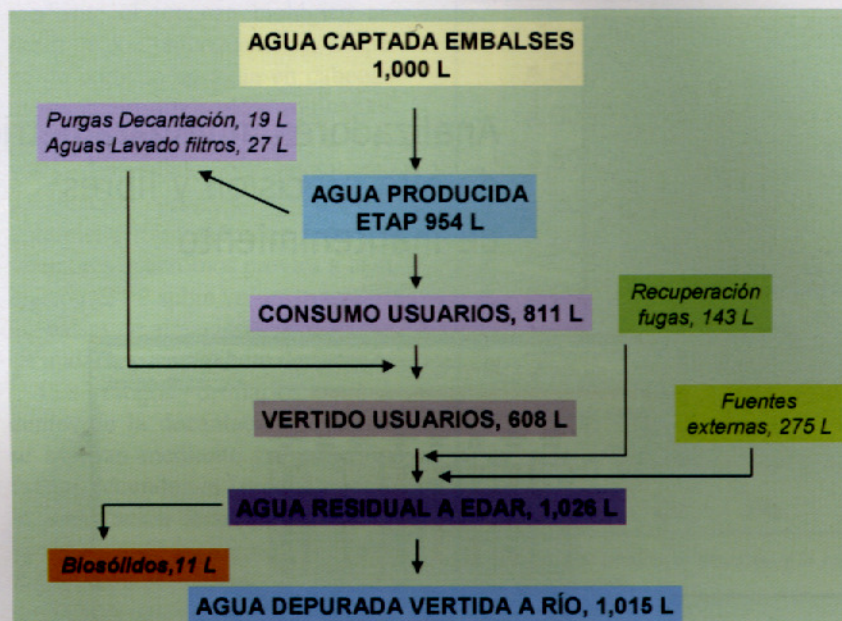


Figura 6. Balance de masas asociado al ciclo integral del agua en Córdoba.

da vertida a cauce público de unos 80.533 m³ al día de media.

En otro orden de cosas, la **Tabla 5** presenta las características de los biosólidos producidos en la EDAR tras su deshidratación vía decantación centrífuga. Presentan un alto contenido en materia orgánica (>70%) y un contenido en metales pesados aceptablemente reducido, lo que permite el uso de estos biosólidos en aprovechamiento agrícola al cumplir con la normativa vigente.

En este sentido, la **Figura 5** compara los datos medios de metales presentes en los biosólidos con lo establecido en el RD sobre utilización de lodos de depuración. Se deduce que cada kg de lodo seco (21% de sequedad) contenía unos 11 g de metales, por tanto, un 1,1% sobre peso total. De todos los metales investigados en la materia seca, el mayoritario fue el hierro, con el 88% sobre el total de metales y 9,8 g/kg, seguido del zinc y del cobre, con 0,48 g/kg y 0,46 g/kg (4% en ambos casos) respectivamente. El resto de metales se encontraba en menos de 0,06 g/kg y, por lo tanto, representaban menos del 0,5% sobre el total.

A destacar, por último, que el contenido en metales no pesados en

el biosólido, aunque eran metales mayoritarios tanto en el agua blanca como en el agua residual (Ca, Mg, Na y K), fue de sólo el 0,04%.

3.4. Resumen del balance de masas del ciclo integral del agua en Córdoba

Con los datos aportados en los epígrafes anteriores nos encontramos en condiciones de establecer un balance del flujo de masas asociado al ciclo integral del agua en el caso de Córdoba, aportando datos muy aproximados a la realidad.

El establecimiento de este tipo de estudios puede servir de ayuda en el establecimiento de estrategias de gestión sobre los subproductos de desecho generados en la gestión global del agua (potabilización+de puración) de nuestras ciudades, así como al objeto de estimar los rendimientos esperables de producción de agua blanca y de generación de aguas residuales depuradas. Vamos a resumir el balance diario en Córdoba con los datos disponibles del trienio 2004-2007:

- Captación de agua bruta prepotable: 79.419 m³.
- Producción de agua de consumo en la ETAP: 75.754 m³ (95,39% sobre agua captada).

- Generación de purgas de decantación en la ETAP: 1.527 m³ (1,92% sobre agua captada y 1,87% sobre agua residual).
- Generación aguas lavado filtros en la ETAP: 2.138 m³ (2,69% sobre agua captada y 2,63% sobre agua residual).
- Evacuación de aguas residuales de la ciudad, entrada a la EDAR: 81.447 m³ (incremento bruto del 7,52% sobre agua distribuida).
- Producción de agua depurada en la EDAR: 80.633 m³ (99,00% sobre agua influente a EDAR).
- Producción biosólidos en la EDAR: 814 m³ (1,00% sobre agua influente a EDAR).

Si admitimos que la densidad del agua (bruta prepotable, de consumo, de purgas de decantación y de lavado de filtros, agua residual y fangos de depuración sin tratamiento alguno) fuese 1, es decir, que 1 litro pesase 1 kg (suposición suficientemente razonable), y aplicando las cantidades anteriores, puede inferirse que cada 1.000 l (1 m³) de agua captada en el abastecimiento, se transforman en 954 l de agua de consumo distribuida a la red de suministro, generándose 46 l de aguas de purgas de decantación y de lavado de filtros, las cuales se derivan al saneamiento general.

Para simplificar los cálculos podemos seguir ajustando el balance de masas a la unidad hidráulica por excelencia, que es el m³. Aplicando los datos disponibles se deduce que cada 1.000 l de agua bruta captada para potabilización dan lugar a 1.026 l de agua residual bruta (aumento del 2,6% sobre agua captada y del 7,5% sobre agua distribuida a la red de suministro), que a su vez se transforman en 1.015 l de agua depurada vertida al río Guadalquivir, generándose a su vez 11 l de fangos de depuración sin tratamiento, en los que se englobarían también los subproductos procedentes de la potabilización del agua.

La **Figura 6** esquematiza los flujos de masas que intervienen en el

ciclo integral urbano del agua en el municipio de Córdoba.

Pueden plantearse algunas consideraciones más al respecto. Teniendo en cuenta un 15% aproximadamente de pérdidas y fugas de agua en la red de distribución con respecto al agua distribuida (143 l), puede deducirse razonablemente que los 954 l de agua distribuida para consumo se transforman en 811 l que, efectivamente, llegan al consumidor doméstico e industrial y comercial.

De estos 811 l, aproximadamente un 75% se transforman en agua residual urbana, con lo que el vertido a red de saneamiento sería ahora de 608 l/día. Dado que lo que realmente llega a la EDAR son 1.026 l al día, debe estimarse que existen unos 418 l de agua (41%) no controlados. Suponiendo que las pérdidas y fugas en red teóricamente pudieran recuperarse por diversas vías hacia el saneamiento general (143 l al día), podría cifrarse en unos 275 l diarios (26,8%) la cantidad de contribuciones de aguas de pozos y aprovechamientos externos a la red de suministro (utilizados o no), venarios y arroyos (además de lluvias), que son la causa de que el balance global de agua en la ciudad de Córdoba suponga que se vierta en el orden práctico más agua depurada de la que se capta para consumo humano.

Resumiendo y a fin de clarificar la situación explicada más arriba, en el caso de Córdoba cada 1.000 l de agua natural captada para potabilización se transforman en 811 l de agua que llega al consumidor (81,1% sobre caudal de partida), generándose al final del ciclo un total de 1.015 l de agua depurada (101,5% sobre caudal de partida) y 11 l de fangos de depuración (1,1% sobre caudal de partida).

4. Conclusiones

El ciclo integral del agua en Córdoba es de tipo convencional, con aprovechamiento para abducción de agua destinada a potabilización pro-

cedente de embalses, tratamiento en ETAP convencional, saneamiento integrado de todos los efluentes domésticos e industriales de la ciudad, y depuración en EDAR biológica aerobia.

La ciudad capta 79.419 m³ de agua bruta al día, produce un total de 75.754 m³ de agua de consumo distribuida a la red de suministro y genera 1.517 m³/día de purgas de decantación y 2.138 m³/día de aguas de lavado de filtros.

Toda el agua consumida en la ciudad de Córdoba se revierte al medio natural

El total de agua residual generada al día en el municipio es de 81.447 m³, computándose tanto el agua de purgas de decantación y lavado de filtros de la ETAP, como la de fuentes externas de aguas (usadas o no) conectadas al saneamiento general. En total, se vierten como aguas depuradas al río Guadalquivir 80.633 m³/día.

Los subproductos generados en la ETAP suponen un 4,5% del caudal total del agua residual de la ciudad, aportando un 3,3% de los sólidos en suspensión y un 1,0% de la carga biodegradable de la misma. Tanto purgas de decantación como aguas de lavado de filtros cumplirían con la Ordenanza de Vertidos industriales de la ciudad, y podrían evacuarse directamente al saneamiento general.

Los subproductos generados en la EDAR (mezcla de fangos primarios y secundarios de depuración) supusieron un 1% del caudal de agua residual influente. Una vez deshidratados y convertidos en biosólidos, podían ser perfectamente empleados para aprovechamiento agrícola.

Finalmente, el balance de masas global del abastecimiento implicaba que por cada 1.000 l de agua bruta abducida para potabilización se distribuían a la red de consumo 954 l, de los que se perdían por fugas en red 143 l al día, recibiendo en el saneamiento 275 l al día de fuentes externas al suministro, con lo que se generaban 1.015 l de agua depurada para recarga del río Guadalquivir y un total de 11 l de fangos de depuración frescos. Los fangos ya deshidratados contenían 11 g/kg de metales y casi un 74% de materia orgánica.

5. Agradecimientos

A todos los integrantes del Servicio de Control de Calidad, Calidad y Medio Ambiente de Emacsa.

6. Bibliografía

- [1] AWWA (2005). Standard Methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. Washington.
- [2] Memorias anuales de Emacsa, años 2001-2005.
- [3] Nemerow, N.L.; Dasgupta, A. (1998). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Ed. Díaz de Santos. Madrid.
- [4] Metcalf; Eddy. (2003). Wastewater Engineering. Treatment and reuse, 4th ed. Ed. McGraw Hill. New York.
- [5] Marín Galvín, R. (2005). Caracterización de fangos de la EDAR La Golondrina (Emacsa-Córdoba): su función como receptores finales de la contaminación del agua residual urbana. Tecnología del Agua, núm. 260, pp. 36-44.
- [6] Marín Galvín, R. (2007). Transferencia de contaminación desde el agua residual urbana a los lodos de depuración: caracterización de biosólidos. Tecnología del Agua, núm. 280, pp. 28-36.
- [7] RD 1312/1990, BOE 262 de 1-11-90, que regula la utilización de los lodos de depuración.