

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 810 324**

51 Int. Cl.:

**C02F 3/12** (2006.01)

**C02F 3/30** (2006.01)

**C02F 3/10** (2006.01)

**C02F 3/34** (2006.01)

**C02F 101/30** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.03.2017 PCT/EP2017/055234**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.09.2017 WO17153361**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.03.2017 E 17709061 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020 EP 3426611**

54 Título: **Eliminación biológica de microcontaminantes de agua residuales**

30 Prioridad:

**09.03.2016 SE 1650321**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**08.03.2021**

73 Titular/es:

**VEOLIA WATER SOLUTIONS & TECHNOLOGIES  
SUPPORT (100.0%)  
1 Place Montgolfier, Immeuble L'Aquarène  
94410 Saint-Maurice, FR**

72 Inventor/es:

**CHRISTENSSON, MAGNUS y  
WELANDER, THOMAS**

74 Agente/Representante:

**LINAGE GONZÁLEZ, Rafael**

**ES 2 810 324 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Eliminación biológica de microcontaminantes de agua residuales

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un método para eliminar microcontaminantes, tales como residuos farmacéuticos, de aguas residuales.

10 **Antecedentes**

Los microcontaminantes, tales como residuos farmacéuticos y otras sustancias emergentes, se eliminan de las aguas residuales en un grado muy limitado mediante los procedimientos de tratamiento existentes. Normalmente, los microcontaminantes pasan a través de modernas plantas de tratamiento de aguas residuales (STP, por sus siglas en inglés *Sewage Treatment Plant*) y terminan en aguas receptoras y lodos. Varios estudios han detectado concentraciones de microcontaminantes en aguas receptoras y lodos a niveles perjudiciales para los organismos acuáticos.

El término "microcontaminantes" se refiere a sustancias orgánicas o minerales cuyas propiedades tóxicas, persistentes y bioacumulativas pueden tener un efecto negativo sobre el medio ambiente y/o los organismos (por ejemplo, la feminización de peces debido a sustancias con efectos en el sistema endocrino en el medio ambiente acuático), e incluso sobre la salud humana. Los microcontaminantes son compuestos traza que se producen en pequeñas cantidades en el medio ambiente. Están presentes en muchos productos que se consumen diariamente (fármacos, productos cosméticos, productos fitosanitarios, insecticidas, etc.), en el hogar o en la industria.

Existen muchas clases de microcontaminantes diferentes. Entre ellas se encuentran los productos farmacéuticos, tales como anticonceptivos, calmantes, reguladores de lípidos, bloqueantes beta, antibióticos, tranquilizantes y psicoestimulantes. Alrededor de 200.000 fármacos y productos para la salud diferentes están registrados en los Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea, Japón y otros países. En aguas residuales y aguas superficiales, los productos farmacéuticos humanos y veterinarios se presentan normalmente en concentraciones a intervalos bajos de ng/l (por ejemplo, hormonas sintéticas), concentraciones a intervalos de bajos a altos de ng/l (por ejemplo, bloqueantes  $\beta$ , antibióticos y antiepilépticos) y hasta concentraciones de cientos de ng/l (por ejemplo, calmantes, reguladores de lípidos y medios de contraste para rayos X). Sin embargo, también existen muchas otras clases, tales como productos de higiene personal (PCP), biocidas y productos químicos industriales. Aparte de los microcontaminantes artificiales, están presentes cantidades muy pequeñas de tóxicos que se producen de manera natural, tales como ficotoxinas (por ejemplo, nicotina), micotoxinas y piretrinas, y pueden afectar a los organismos.

Normalmente, las tecnologías de tratamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales actuales no pueden eliminar los microcontaminantes. En la técnica se conoce el tratamiento terciario físico de aguas residuales que contienen microcontaminantes usando materiales de adsorción, tal como la filtración con carbón activado para eliminar los microcontaminantes. Sin embargo, si bien el carbón activado puede eliminar microcontaminantes solubles de las aguas residuales, luego se requiere la separación y eliminación de los microcontaminantes del carbón. La oxidación avanzada con agentes oxidantes, tales como el ozono, es costosa y la oxidación de los microcontaminantes puede conducir a nuevos compuestos que sean potencialmente más tóxicos y que requieran un tratamiento adicional antes de su eliminación.

Se ha sugerido la degradación microbiana de microcontaminantes como una solución energéticamente eficiente para resolver los inconvenientes relacionados con la ozonización y el carbón activado.

La degradación microbiana de microcontaminantes con tecnologías que proporcionan normalmente largos tiempos de retención de los lodos, tales como reactores biológicos de membrana y reactores de biopelícula de lecho móvil (MBBR, por sus siglas en inglés *Moving Bed Biofilm Reactor*), ha demostrado ser prometedora para eliminar microcontaminantes. Sin embargo, la implementación del tratamiento terciario para la eliminación de microcontaminantes con un sistema biológico se ha visto limitada por factores que incluyen el mantenimiento de la cantidad de biomasa microbiana disponible para la degradación y la baja concentración de microcontaminantes en las aguas residuales. A su vez, esto ha conducido a bajas tasas de eliminación de microcontaminantes.

El documento WO 00/15565 A2 da a conocer un biorreactor que tiene un lecho de gránulos de medios favorables que flotan dentro de un filtrado que va a procesarse. El biorreactor se usa para cultivar microorganismos y algas para diversos fines.

El documento EP 1 431 252 A2 da a conocer un elemento de filtro para un dispositivo de clarificación para el tratamiento biológico de aguas. El filtro tiene una etapa de tratamiento biológico en la que el agua se trata mediante microorganismos aerobios que residen en un cuerpo poco profundo con huecos que está abierto por uno o ambos lados.

El documento CN 201896101 U da a conocer un medio de suspensión de microbios para un reactor de biopelícula de lecho móvil que amplía el área superficial del portador, es beneficioso para la adhesión y el crecimiento de los microbios y aumenta la tasa de contacto de la biopelícula y el oxígeno.

- 5 El documento WO 2013/151836 A1 da a conocer un procedimiento para eliminar amonio de una corriente de aguas residuales. El procedimiento utiliza bacterias oxidantes de amonio (AOB) y bacterias oxidantes de amonio anaerobias (ANAMMOX).

10 Pusker Regmi *et al.*: NOB Repression for Mainstream Nitrite-Shunt y Deammonification: A Pilot Study. WEFTEC 2013. Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2013: sesión 26 a sesión 34, págs. 1959-1981 (23) dan a conocer un estudio de dos etapas para probar la viabilidad de la desamonificación y la supresión de NOB de la corriente principal en el tratamiento de aguas residuales.

15 Los documentos US2013/337518, US5651892 y WO2004/087583 dan a conocer métodos para tratar aguas residuales.

Sigue existiendo la necesidad de un método de tratamiento de aguas residuales mejorado para eliminar los microcontaminantes de las mismas.

## 20 **Sumario**

La presente invención busca mitigar, aliviar, evitar o eliminar al menos una, tal como una o más, de las deficiencias identificadas anteriormente al proporcionar un método, tal como se describe en la reivindicación 1, para eliminar, al menos parcialmente, al menos un microcontaminante de agua residual, que comprende compuestos carbonosos y al menos un microcontaminante. El método comprende las etapas de: (a) dividir el agua residual en una corriente principal y una corriente secundaria, (b) tratar la corriente principal con bacterias para reducir el contenido de compuestos carbonosos para proporcionar agua residual empobrecida que comprende al menos un microcontaminante, (c) tratar el agua residual empobrecida con una segunda porción de microorganismos, que tienen la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante, para eliminar, al menos parcialmente, el al menos un microcontaminante proporcionando de ese modo agua tratada, en el que la segunda porción de microorganismos se ha enriquecido alimentando la corriente secundaria a la misma antes de usar la segunda porción de microorganismos en el tratamiento del agua residual empobrecida, (d) alimentar una primera porción de microorganismos, que tienen la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante, con la corriente secundaria, para enriquecerlas para su uso posterior en el tratamiento del agua residual empobrecida para eliminar, al menos parcialmente, el al menos un microcontaminante. A continuación, y en las reivindicaciones adjuntas de la patente, se dan a conocer realizaciones ventajosas adicionales.

## **Breve descripción de los dibujos**

40 Estos y otros aspectos, características y ventajas de las que es capaz la invención resultarán evidentes y se aclararán a partir de la siguiente descripción de realizaciones de la presente invención, haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que

45 la figura 1 muestra un método de tratamiento de agua residual de la técnica anterior;

las figuras 2A-C ilustran un método de tratamiento de agua residual según una realización de la presente invención;

50 la figura 3 representa un método de tratamiento de agua residual según una realización alternativa de la presente invención;

las figuras 4A-B muestran un método de tratamiento de agua residual según otra realización de la presente invención;

55 las figuras 5A-B muestran la concentración de diversos microcontaminantes en función del tiempo en agua residual tratada según el método de las figuras 4A-B; y

la figura 6A-B muestran constantes de velocidad de eliminación de microcontaminantes por gramo de biomasa por litro ( $k_{bio}$ ) en agua residual tratada según el método de la presente invención.

## 60 **Descripción de realizaciones**

La siguiente descripción se centra en tres realizaciones de la presente invención aplicables a un método de tratamiento de agua residual para eliminar microcontaminantes. Sin embargo, se apreciará que la invención no se limita a esta aplicación, sino que puede aplicarse a otras fuentes de agua.

65 La figura 1 representa un método 100 de tratamiento de agua residual conocido. En el tratamiento de agua residual,

es importante que muchas áreas de descarga no sólo reduzcan la materia orgánica (es decir, el carbono), sino también el contenido de compuestos de nitrógeno y fósforo con el fin de evitar la eutrofización. El modo más común para eliminar extensivamente el nitrógeno es a través de nitrificación y desnitrificación biológicas, en las que las bacterias nitrificantes oxidan el amoníaco para dar nitrato en condiciones aerobias y las bacterias desnitrificantes reducen el nitrato producido para dar gas de nitrógeno en condiciones anóxicas.

En el método 100, el agua residual no tratada en bruto se criba 110 para eliminar objetos grandes, tales como pelo, papel y tela. El cribado 110 puede utilizar una criba de barras. Después, el agua residual se somete a sedimentación y/o filtración 120, en la que se eliminan las partículas más pequeñas que pasaron a través de la criba 110. La sedimentación y/o filtración 120 puede realizarse mediante una unidad de sedimentación o una unidad de filtración bajo la influencia de la gravedad. La materia orgánica soluble apenas se elimina mediante el cribado 110 y la sedimentación 120. Por tanto, el agua residual se somete luego a oxidación biológica en condiciones 130 aerobias para convertir el contenido de carbono en dióxido de carbono y agua. Es necesario que el amoníaco restante, que no se usa para la asimilación para elaborar nueva biomasa, se oxide mediante bacterias nitrificantes, incluyendo las bacterias oxidantes de amonio que oxidan el amoníaco para dar nitrito y las bacterias oxidantes de nitrito que oxidan adicionalmente el nitrito para dar nitrato. En una etapa 140 de nitrificación aerobia, las bacterias contenidas en un lodo o dispuestas en elementos portadores (no mostrados) consumirán los compuestos orgánicos y oxidarán el amonio para dar nitrato,  $\text{NO}_3^-$ . La etapa 140 de nitrificación depende del aire que se bombea a través del recipiente que contiene el lodo y el agua residual, dado que se requiere oxígeno para oxidar los compuestos orgánicos y el amonio para dar nitrato. Las bacterias nitrificantes son bacterias autótrofas de crecimiento lento, por lo que es común proporcionar etapa(s) independiente(s) para la nitrificación 140 para evitar que las bacterias heterótrofas de crecimiento rápido dejen fuera de la competición a las bacterias nitrificantes. Sin embargo, tanto la oxidación como la nitrificación de carbono orgánico pueden tener lugar en la misma etapa si el tiempo de retención del lodo (SRT) promedio es lo suficientemente largo. Después se somete a desnitrificación el nitrato producido a partir de la etapa de nitrificación en una etapa 150 de desnitrificación anóxica. Esta etapa tiene lugar en condiciones anóxicas, es decir, sin oxígeno, y también requiere un donador de electrones, por ejemplo, en forma de materia orgánica biodegradable (CH), con el fin de reducir el nitrato para dar  $\text{N}_2$ . Cuando la etapa 150 de desnitrificación se ubica después de la etapa 140 de nitrificación, el carbono soluble biodegradable disponible de manera natural requerido para la desnitrificación es muy bajo debido a la oxidación aerobia previa y no lo suficiente para la desnitrificación que normalmente es necesaria. Al añadir fuentes externas de carbono, tales como metanol o etanol, puede obtenerse una alta tasa de desnitrificación y pueden lograrse bajas concentraciones de nitrato en el efluente. Sin embargo, las fuentes externas de carbono a menudo son costosas y dan como resultado un alto coste de funcionamiento. Por tanto, es común incluir una etapa previa a la desnitrificación anóxica antes de la(s) etapa(s) aerobia(s) a la que se devuelve el agua residual nitrificada mediante recirculación interna. De este modo, el carbono presente de manera natural se usa como fuente de carbono en lugar de, o además de, una fuente de carbono añadida de manera externa. El inconveniente es la menor tasa de desnitrificación obtenida en la(s) etapa(s) previa(s) a la desnitrificación en comparación con las la(s) etapa(s) posterior(es) a la desnitrificación. Para lograr bajas concentraciones de nitrato en el efluente con sólo la desnitrificación previa, se requieren altos flujos de recirculación interna, con desventajas tales como grandes instalaciones de bombas internas con una mayor demanda de electricidad y cargas hidráulicas mucho mayores a través de las etapas de reactor. En el método 100, el agua 170 tratada se obtiene después de la etapa 150 de desnitrificación. En las realizaciones a continuación, el agua tratada según el método 100 se denominará agua 107 residual empobrecida, dado que el nivel de nutrientes en el agua tratada es muy bajo. En una realización, el agua (107) residual empobrecida se define por una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de hasta 50 g de  $\text{O}_2/\text{m}^3/5$  d o preferiblemente de 0 a 10 g de  $\text{O}_2/\text{m}^3/5$  d. En una realización, el agua (107) residual empobrecida se define por una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 0 a 50 g de  $\text{O}_2/\text{m}^3/5$  d o preferiblemente de 0 a 10 g de  $\text{O}_2/\text{m}^3/5$  d, una concentración de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) de 0 a 200 mg(N)/l, o de 0 a 50 mg(N)/l, o preferiblemente de 0 a 20 mg(N)/l y una concentración de  $\text{NO}_2^-$  de 0 a 200 mg(N)/l, o de 0 a 50 mg(N)/l, o preferiblemente de 0 a 20 mg(N)/l.

El fósforo del agua residual, además del fósforo requerido para el crecimiento de células bacterianas, puede eliminarse mediante precipitación química mejorada o mediante eliminación biológica mejorada de fósforo (EBPR), o con una combinación de ambas.

Los métodos químicos mejorados incluyen la adición de sales de metales, tales como hierro o aluminio, al agua residual que precipitan el fósforo soluble. Esto puede realizarse como parte del tratamiento primario, eliminando el lodo químico con los sólidos primarios en la unidad de filtro o de sedimentación previa, o puede realizarse como parte de un tratamiento posterior, en el que se añaden productos químicos al agua residual del efluente de la etapa biológica y se retiran como lodo químico en las unidades de filtro o de sedimentación. También puede aplicarse una precipitación simultánea, en la que se añaden productos químicos en la(s) etapa(s) biológica(s) y el lodo químico y biológico se separa en unidades de sedimentación y abandona el procedimiento como lodo en exceso. En los procedimientos de EBPR, se obtiene un enriquecimiento de organismos acumuladores de fosfato (PAO) alternando la exposición de las bacterias a condiciones anaerobias, sin que estén presentes aceptores de electrones, tales como oxígeno o nitrato, y a condiciones aerobias o anóxicas, en las que se usa oxígeno o nitrato para la captación de fosfato.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales actuales no pueden eliminar microcontaminantes hasta un nivel

satisfactorio. En una planta de tratamiento de aguas residuales, los microcontaminantes se disolverán en el agua residual o se adsorberán en el lodo y podrán descomponerse hasta cierto punto mediante procedimientos químicos o bioquímicos (tales como hidrólisis, oxidación o fotodegradación) y biotransformarse de manera enzimática. Por ejemplo, se ha encontrado que, durante la eliminación de nitrógeno, también pueden eliminarse los microcontaminantes hasta cierto punto. Sin embargo, en las plantas de tratamiento de aguas residuales actuales, esto no es suficiente para eliminar por completo los diferentes microcontaminantes del agua residual.

En general, los microcontaminantes se reconocen como “sustratos sin crecimiento” ya que se encuentran en el agua residual en una concentración demasiado baja para soportar el crecimiento de biomasa. Por tanto, la biotransformación de microcontaminantes se lleva a cabo principalmente a través de los procesos de cometabolismo, en la que la eliminación de sustratos sin crecimiento requiere la presencia de sustratos primarios (es decir, DQO, nutrientes) para soportar el crecimiento de biomasa. Además, el cometabolismo es el resultado de “la falta de especificidad de enzimas y cofactores”, en el que la biotransformación del microcontaminante es el resultado de reacciones de degradación (cometabólica) “intencionada”. El sustrato primario y el microcontaminante compiten por el mismo centro activo de la enzima no específica.

A pesar de que el cometabolismo se ha visto como la principal ruta de eliminación de microcontaminantes, numerosos estudios investigan el metabolismo directo de los compuestos orgánicos, en el que los microorganismos utilizan los microcontaminantes como única fuente de energía y carbono. Se encontró que un cultivo de *Sphingomonas* podía degradar el ibuprofeno como única fuente de carbono, así como que *Novosphingobium* JEM-1 podía degradar el estradiol (E2). Sin embargo, los microcontaminantes se encuentran, en general, en concentraciones demasiado bajas para eliminarse por medio del metabolismo.

En la invención, los problemas anteriores y otros se resuelven o al menos se mitigan mediante la invención para la eliminación biológica de microcontaminantes, en la que las bacterias en el procedimiento biológico para la eliminación de microcontaminantes se exponen periódicamente a un alto contenido de una fuente de carbono fácilmente biodegradable y se exponen periódicamente a una corriente de agua residual con un bajo contenido de una fuente de carbono fácilmente biodegradable (es decir, agua 107 residual empobrecida), proporcionando de ese modo condiciones para la eliminación mejorada de microcontaminantes.

Durante la fase anaerobia, las bacterias captan fuentes de carbono fácilmente biodegradables, tales como ácidos grasos volátiles (AGV), y las almacenan internamente como ácidos polihidroxialcanoicos (PHA). La energía requerida para el almacenamiento de PHA en condiciones anaerobias se obtiene a partir de la escisión de polifosfato y glucógeno almacenados previamente. Cuando las bacterias enriquecidas en PHA entran en condiciones anóxicas o aerobias, los PHA se usan como fuente de carbono para el crecimiento celular y el realmacenamiento de polifosfato y glucógeno.

La exposición a carbono fácilmente biodegradable puede realizarse o bien cambiando temporalmente el flujo de agua al/a los reactor(es) biológico(s), desde el agua para la eliminación de microcontaminantes (es decir, agua 107 residual empobrecida), siendo escasa en carbono biodegradable, hasta agua con un contenido significativamente mucho mayor de carbono fácilmente biodegradable, o bien moviendo las bacterias, preferible, pero no únicamente, presentes como biopelícula en un medio de soporte, tal como los portadores suspendidos en un reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR), pero no el agua, a un nuevo recipiente en el que el agua contiene un contenido significativamente mucho mayor de carbono fácilmente biodegradable.

En ambos casos, la ventaja clave de suministrar microorganismos privados de nutrientes/hambrientos, tales como bacterias, hacia carbono fácilmente biodegradable proporciona sustrato(s) orgánico(s) a través de adsorción, absorción y crecimiento para una eliminación mejorada de microcontaminantes en condiciones en las que el carbono biodegradable es escaso y limitado. Con los esquemas presentados, la fuente de carbono puede transferirse, por ejemplo, desde agua residual biológica no tratada en las etapas tempranas de la línea de tratamiento (denominada en este caso agua residual de la corriente 106 secundaria) hasta la parte aguas abajo de la línea de tratamiento, sin llevar consigo las altas concentraciones iniciales de microcontaminantes, nitrógeno y fósforo. Por tanto, en la invención, el agua residual se divide en una corriente 106 secundaria de agua residual no tratada de manera biológica antes o en las etapas tempranas de la línea de tratamiento y una corriente 105 principal que se trata con bacterias para reducir el contenido de compuestos carbonosos para proporcionar agua 107 residual empobrecida. El agua residual empobrecida, todavía con un alto contenido de microcontaminantes, se trata luego con microorganismos, tales como bacterias, que tienen la capacidad de degradar al menos un microcontaminante, para eliminar, al menos parcialmente, el al menos un microcontaminante y proporcionar agua 170 tratada. Para permitir que los microorganismos, tales como bacterias, mantengan un cultivo viable y eliminen eficazmente los microcontaminantes del agua 107 empobrecida, los microorganismos en el procedimiento biológico para la eliminación de microcontaminantes se exponen periódicamente a un alto contenido de carbono biodegradable.

Por tanto, en una realización, se proporciona un método 200, 300, 400 para eliminar, al menos parcialmente, al menos un microcontaminante de agua 104 residual junto con compuestos carbonosos. Con referencia a las figuras 2 a 4, el método comprende las etapas de: (a) dividir el agua 104 residual en una corriente 105 principal y una corriente 106 secundaria; (b) tratar la corriente 105 principal con bacterias para reducir el contenido de compuestos

carbonosos para proporcionar agua 107 residual empobrecida que comprende al menos un microcontaminante; (c) tratar el agua 107 residual empobrecida con una segunda porción de microorganismos 162, que tienen la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante, para eliminar, al menos parcialmente, el al menos un microcontaminante proporcionando de ese modo agua 170 tratada, en el que la segunda porción de microorganismos 162 se ha enriquecido alimentando la corriente secundaria a la misma antes de usar la segunda porción de microorganismos 162 en el tratamiento del agua 107 residual empobrecida; y (d) alimentar una primera porción de microorganismos 161, que tienen la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante, con la corriente 106 secundaria, para enriquecerlas para su uso posterior en el tratamiento del agua 107 residual empobrecida para eliminar, al menos parcialmente, el al menos un microcontaminante.

El nivel de nutrientes de la corriente 106 secundaria debe ser lo suficientemente alto para alimentar a los microorganismos, tales como bacterias, y como tal tiene un nivel alto de carbono biodegradable. Esto puede medirse como la cantidad de oxígeno disuelto necesaria por los organismos biológicos aerobios para romper el material orgánico presente en una muestra de agua dada a una determinada temperatura a lo largo de un periodo de tiempo específico (en este caso, 5 días y 20°C). Según la invención, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del agua residual de la corriente 106 secundaria es mayor que la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del agua 107 residual empobrecida. Más específicamente, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del agua residual de la corriente 106 secundaria es mayor de 100 g de  $O_2/m^3/5$  d, conteniendo un nivel de carbono biodegradable.

En una realización, la corriente 106 secundaria se retroalimenta a la corriente 105 principal en la etapa (b) para el tratamiento con bacterias para reducir el contenido de compuestos carbonosos, después de que la corriente 106 secundaria se haya usado para alimentar a los microorganismos 161, 162 ó 163 en la etapa (d).

Como alternativa al uso de agua residual biológica no tratada como fuente de carbono biodegradable, la dosificación externa de carbono puede suministrarse temporalmente a los microorganismos empobrecidos en carbono. Por tanto, en una realización, se añade un aditivo de carbono, tal como metanol o etanol, al agua residual de la corriente 106 secundaria para ajustar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) a al menos 100 g de  $O_2/m^3/5$  d.

Los microorganismos para la eliminación de microcontaminantes, tales como bacterias y hongos, tienen una capacidad única para usar los compuestos químicos que los microcontaminantes representan, o bien para la regeneración de energía o bien como componentes básicos para el crecimiento u otros modos de creación de condiciones favorables para el crecimiento. La gran variedad de compuestos químicos, que representan miles de compuestos artificiales diferentes, tendrá un impacto directo en la asociación microbiana establecida en el sistema de tratamiento biológico. Dado que microorganismos diferentes tienen capacidades diferentes para degradar los microcontaminantes, dadas por el genoma microbiano y las condiciones medioambientales, cada agua residual con microcontaminantes dará lugar a una asociación bacteriana única debido a que ningún agua residual tendrá una composición idéntica de microcontaminantes. Sin embargo, son comunes para todos los sistemas biológicos que los microorganismos elegirán principalmente compuestos que proporcionan el mayor crecimiento posible con los menores requisitos posibles, por lo que la degradación de los microcontaminantes más recalcitrantes se inicia en primer lugar cuando se consumen sustratos más favorables. Los microcontaminantes están presentes normalmente en bajas concentraciones y requieren un alto aporte de energía para los microorganismos en comparación con los beneficios obtenidos de energía o componentes básicos, por lo que la tasa de crecimiento disminuye significativamente.

Por tanto, los microorganismos para la eliminación de microcontaminantes se ajustarán automáticamente a los micronutrientes en el agua residual que va a tratarse. Una consecuencia importante de esto es que el método de la invención funcionará y se adaptará a nuevos microcontaminantes. Muchos microcontaminantes son "contaminantes emergentes", es decir, productos químicos contaminantes que sólo se han analizado o identificado recientemente en el medio ambiente. Pueden encontrarse contaminantes emergentes debido a la reducción con éxito de contaminantes primarios conocidos, los avances de las tecnologías analíticas, la aparición de nuevos compuestos peligrosos a partir del desarrollo y la producción de nuevos compuestos o la acumulación lenta de contaminantes de fuentes tales como desinfectantes, filtros de protección solar/UV, compuestos perfluorados y retardantes de llama bromados. Dado que cada año se desarrolla una amplia gama de productos químicos novedosos, continúan emergiendo nuevos compuestos peligrosos.

Además de la eliminación de microcontaminantes, pueden obtenerse beneficios adicionales en el método de la invención con la eliminación mejorada de nitrógeno y fósforo, en la que la eliminación mejorada de microcontaminantes puede lograrse en combinación con la desnitrificación posterior y/o la eliminación mejorada de fósforo con organismos acumuladores de fosfato (PAO). Por tanto, si el agua 107 residual empobrecida contiene mayores niveles de nitrógeno y fósforo, los microorganismos para la eliminación de microcontaminantes también pueden ajustarse para incluir la desnitrificación posterior y/o la eliminación mejorada de fósforo con PAO.

En figuras 5A-B, se resumen ensayos experimentales que usan el método de la invención. Después de 4 meses de funcionamiento continuo usando un efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales y agua residual en bruto diluida, se añadieron adiciones conocidas de 17 productos farmacéuticos recalcitrantes (a concentraciones de 3,43-19,32  $\mu g/l$ ) al efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales para su eliminación. Los productos

farmacéuticos se seleccionaron de microcontaminantes comunes a menudo presentes en aguas residuales municipales, tal como se usó durante los ensayos. Se encontró que después de los 4 meses de funcionamiento, 14 de los 17 compuestos se degradaron a más del 20%, tal como se observa en las figuras 5A-B. Sorprendentemente, incluso fármacos tales como el diclofenaco, un fármaco antiinflamatorio no esteroideo (AINE) que se sabe que es difícil de degradar, se encontraban entre los 14 compuestos parcialmente eliminados (véase la figura 5A).

En una realización, el al menos un microcontaminante se selecciona del grupo que consiste en: productos farmacéuticos o metabolitos de productos farmacéuticos, tales como hormonas sintéticas, calmantes, reguladores de lípidos, bloqueantes  $\beta$ , antibióticos, antidepresivos, analgésicos, antiepilépticos o psicoestimulantes; productos médicos, tales como agentes de contraste radiológico (medios de contraste yodados para rayos X); productos farmacéuticos veterinarios, tales como hormonas o antibióticos; aditivos de piensos para animales, tales como potenciadores del crecimiento; productos de higiene personal (PCP), tal como protectores solares/UV, antioxidantes, conservantes, antimicrobianos, nitroalmizcles y almizcles policíclicos, subproductos de desinfección o repelentes contra insectos; biocidas, tales como herbicidas, insecticidas, fungicidas o biocidas; o productos químicos industriales, tales como retardantes de llama, antioxidantes, plastificantes, complejos de coordinación, inhibidores de la corrosión, refrigerantes, productos de incineración. En una realización adicional, el al menos un microcontaminante se selecciona del grupo que consiste en sulfadiazinas (sulfametoxazol, AC-sulfadiazina, sulfadiazina), diclofenaco, propranolol, sulfametizol, venlafaxina, carbamazepina, iopromida, iohexol, iopamidol, iomeprol, citalopram, atenolol, metoprolol, propranolol, sotalol, trimetoprima, ciprofloxacina, tramadol, 17 $\alpha$ -etinilestradiol, clarotromicina, eritromicina, roxitromicina, ácido diatrizoico, fenazona, 17 $\alpha$ -etinilestradiolibuprofeno, naproxeno, bezafibrato, ácido fenofibrico, ácido clofibrico, cafeína, exiopromida, acetato de trembolona, tetraciclina, cloramfenicol, roxarsona arsénica, metilbencilidenalcanfor (4-MBC), ácido hidroxibenzoico, triclosán, Tonalide (AHTN), N-nitrosodimetil-amina (NDMA), N,N-dietil-meta-toluamida (DEET), alaclor, atrazina, bentazona, 2,4 D, diurón, carbarilo, dieldrina, diclorodifeniltricloroetano (DDT), vinclozolin tributilestaño (TBT), difenil éteres bromados (PBDE), nonilfenol (NP), bisfenol A, ácido perfluorooctanosulfónico (PFOS), ácido perfluorooctanoico (PFOA), hidroxianisol butilado (BHA), ftalato de dietilo (DEP), ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), benzotriazol (BTSA), dioxinas e hidrocarburos poliaromáticos (PAH).

En el método 200, se muestra un procedimiento de tratamiento de agua residual con carbono, nitrógeno, fósforo y la eliminación mejorada de microcontaminantes cambiando la dirección del flujo del agua residual. Las figuras 2A, 2B, 2C presentan una vista esquemática de una realización de un procedimiento de tratamiento de agua residual a modo de ejemplo con carbono, nitrógeno y la eliminación mejorada de microcontaminantes con alimentación alterna a la etapa de eliminación de microcontaminantes. La eliminación de microcontaminantes ejemplificada con tres etapas 164, 165, 166 de reactor biológico y tres fases diferentes de funcionamiento, 1<sup>a</sup> fase (vista superior) 2<sup>a</sup> fase (centro) y 3<sup>a</sup> fase (parte inferior).

Las etapas 110 - 150 de tratamiento son similares a un ejemplo de tratamiento tradicional tal como se ejemplifica en el método 100 y la figura 1, en el que sólo se eliminan los microcontaminantes más fácilmente biodegradables. Los microcontaminantes más recalcitrantes se tratan adicionalmente y se eliminan en el tratamiento 160 posterior.

En una realización, la etapa de tratar la corriente 105 principal (es decir, la etapa (b)) comprende tratar la corriente principal con bacterias para reducir el contenido de compuestos carbonosos para proporcionar agua 107 residual empobrecida que comprende al menos un microcontaminante. En una realización, la etapa de tratar la corriente 105 principal para reducir el contenido de compuestos carbonosos y nitrogenados (es decir, la etapa (b)) comprende tratar la corriente principal con bacterias 130 para eliminar compuestos orgánicos, tratar la corriente principal con bacterias en condiciones 140 aerobias para oxidar el  $\text{NH}_4^+$  para dar  $\text{NO}_3^-$ , y/o tratar la corriente principal con bacterias en condiciones 150 anóxicas para convertir el  $\text{NO}_3^-$  en  $\text{N}_2$ . En una realización, la etapa (b) comprende las etapas consecutivas de tratar la corriente principal con bacterias en condiciones 130 aerobias para eliminar compuestos orgánicos. Tratar la corriente principal con bacterias en condiciones 140 aerobias para oxidar el  $\text{NH}_4^+$  para dar  $\text{NO}_3^-$ . Tratar la corriente principal con bacterias en condiciones 150 anóxicas para convertir el  $\text{NO}_3^-$  en  $\text{N}_2$ .

La invención con el cambio de dirección del flujo de agua al tratamiento 160 de microcontaminantes aguas abajo se ejemplifica en las figuras 2A-C. Una etapa 164 de reactor biológico está, en la primera fase, temporalmente fuera de la línea principal de tratamiento posterior, recibiendo agua residual biológica no tratada con alto contenido en carbono fácilmente biodegradable, que es la corriente 106 secundaria desviada de la corriente 105 principal antes de las etapas 110 - 150 de tratamiento, o posiblemente después de las etapas 110 ó 120 de tratamiento, tal como puede observarse en las figuras 2A-C. En condiciones anaerobias, en la etapa 164 se obtiene un enriquecimiento de productos de almacenamiento orgánicos, tales como PHA, dentro de los microorganismos 161, tales como bacterias. El agua residual de salida de esta etapa está regresando a la línea principal de tratamiento para su tratamiento adicional. Aguas abajo, se realiza la eliminación de microcontaminantes, nitrógeno y fósforo en la línea principal de tratamiento en 165 y 166 con una capacidad de eliminación mejorada debido a la fuente de carbono obtenida por los microorganismos 162 y 163, tales como bacterias, de la(s) fase(s) de almacenamiento previa(s).

En la segunda fase, ejemplificada en la figura 2, tiene lugar un cambio en el flujo de agua residual, que dirige el efluente desde 150 hacia la etapa 164, ahora con microorganismos 161, tales como bacterias, enriquecido con carbono orgánico, en la que después el agua residual continúa hacia la etapa 165 para su tratamiento adicional. La

etapa 166, que es el reactor con el carbono biodegradable más bajo disponible, debido al tiempo de funcionamiento prolongado en la línea principal de tratamiento, se retira de la línea de tratamiento posterior y se suministra con agua residual biológica no tratada para el enriquecimiento bacteriano del suministro de carbono biodegradable, para los microorganismos 163. Cuando la etapa 164 se pone en funcionamiento en la línea principal de tratamiento, el carbono orgánico almacenado de los microorganismos 161, tal como los ácidos polihidroxicarboxílicos (PHA), se usa para una variedad de actividades metabólicas diferentes. Por ejemplo, en condiciones anóxicas, las bacterias heterótrofas pueden desnitrificar el nitrato y el nitrito para dar gas de nitrógeno, usando los PHA como donadores de electrones. Los PAO tienen la capacidad de usar los PHA como fuente de carbono para la captación potenciada de fósforo y esto puede tener lugar en condiciones tanto aerobias como anóxicas con oxígeno y nitrato, respectivamente, como aceptores de electrones. La actividad y el crecimiento biológico, debido al uso de PHA almacenados, proporcionan las condiciones para la eliminación mejorada de microcontaminantes a través de cometabolismo. Además de la eliminación mejorada de microcontaminantes, puede lograrse simultáneamente la eliminación mejorada de nitrógeno y/o fósforo proporcionando la mayor eficiencia posible de la utilización de PHA. En la etapa 165 de la fase 2, tiene lugar la eliminación adicional de microcontaminantes, nitrógeno y fósforo.

En una realización, el método comprende al menos dos ciclos. En el primer ciclo, la segunda porción de microorganismos 162 se usa para tratar el agua 107 residual empobrecida, mientras que la primera porción de microorganismos 161 se usa para tratar la corriente 106 secundaria. En el segundo ciclo, la primera porción de microorganismos 161 se usa para tratar el agua 107 residual empobrecida, mientras que la segunda porción de microorganismos 162 se usa para tratar la corriente 106 secundaria.

La división en más de una etapa en la línea principal de tratamiento de microcontaminantes proporciona las ventajas de usar diferentes condiciones redox (aireadas o no aireadas), pero también proporciona los beneficios de optimizar las tasas de eliminación, en la que se obtiene una mayor tasa de eliminación a la(s) mayor(es) concentración/concentraciones de sustrato.

En una realización, las porciones de microorganismos 161, 162, 163 que tienen la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante son o bien aireadas o bien no aireadas, o una combinación de aireadas y no aireadas.

Por ejemplo, si la etapa 164 en la fase 2 se hace funcionar en condiciones anóxicas, la etapa 165 puede hacerse funcionar en condiciones aerobias, usando los PHA restantes para el crecimiento y la captación potenciada de fosfato con oxígeno como aceptor de electrones, con condiciones aerobias para la eliminación mejorada de microcontaminantes. Más adelante, las condiciones aerobias ofrecen la posibilidad de oxidar el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) restante en el agua residual para dar nitrito y nitrato. La nitrificación autótrofa, en la que el amonio es el donador de energía y el oxígeno el aceptor de electrones, proporciona condiciones favorables para la eliminación mejorada de microcontaminantes. En la tercera fase en la figura 2, la etapa 166 de reactor vuelve a ponerse en la línea principal de tratamiento cambiando la salida de 150 en esta etapa, en la que después el agua fluye hasta 164 y después de eso abandona el sistema. El reactor 165 se alimenta con agua residual biológica no tratada para un almacenamiento de carbono mejorado con el fin de completar el ciclo, en el que la siguiente fase después de la tercera es de nuevo la primera fase.

Por tanto, en una realización, se usan al menos dos etapas 164 y 165 de reactor diferentes para la etapa 160 de tratamiento de microcontaminantes (es decir, la etapa (c)). En una realización adicional, se usan al menos tres etapas 164, 165 y 166 de reactor, tal como 4 ó 5 etapas de reactor, para la etapa 160 de tratamiento de microcontaminantes (es decir, la etapa (c)). En una realización adicional, las entradas de las etapas 164, 165 y 166 de reactor puede cambiarse entre la corriente 106 secundaria, la corriente de agua 107 empobrecida y la salida de las otras etapas 164, 165, 166 de reactor. De manera similar, las salidas de las etapas pueden cambiarse entre las otras etapas 164, 165, 166 de reactor, de vuelta a la línea principal de tratamiento para su tratamiento adicional, o como salida para el agua 170 tratada.

En una realización, el método comprende tratar el agua residual empobrecida con una segunda porción de microorganismos 162, tales como bacterias, junto con una tercera porción de microorganismos 163, que tienen ambas la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante, proporcionando de ese modo agua 170 tratada, mientras que la primera porción de microorganismos 161 está enriqueciéndose mediante la alimentación con la corriente 106 secundaria.

En una realización, el método comprende al menos tres ciclos. En el primer ciclo, la segunda porción de microorganismos 162, tales como bacterias, seguido por la tercera porción de microorganismos 163 se usan para tratar el agua 107 residual empobrecida, mientras que la primera porción de microorganismos 161 se usa para tratar la corriente 106 secundaria. En el segundo ciclo, la primera porción de microorganismos 161 seguido por la segunda porción de microorganismos 162 se usan para tratar el agua 107 residual empobrecida, mientras que la tercera porción de microorganismos 163 se usa para tratar la corriente 106 secundaria. En el tercer ciclo, la tercera porción de microorganismos 163 seguido por la primera porción de microorganismos 161 se usan para tratar el agua 107 residual empobrecida, mientras que la segunda porción de microorganismos 162 se usa para tratar la corriente 106 secundaria.

En el método 300, se muestra un procedimiento de tratamiento de agua residual con carbono, nitrógeno, fósforo y la eliminación mejorada de microcontaminantes mediante la transferencia de microorganismos 161, 162, 163, tales como bacterias, hacia atrás y hacia adelante entre las etapas 164, 165, 166 de reactor. La figura 3 presenta una vista esquemática de una realización de acceso alterno a compuestos de carbono fácilmente biodegradables mediante la transferencia de microorganismos 161, 162, 163 hacia atrás y hacia adelante entre las etapas 164, 165, 166 de reactor. Las etapas 110 - 150 de tratamiento son similares a un ejemplo de tratamiento tradicional tal como se ejemplifica en la figura 1, en el que sólo se eliminan los microcontaminantes más fácilmente biodegradables. El agua residual se divide en una corriente 105 principal que se trata mediante las etapas 110 - 150 de tratamiento y una corriente 106 secundaria que se trata mediante ninguna, o las etapas 110 ó 110 y 120, de las etapas 110 - 150 de tratamiento. Los microcontaminantes más recalcitrantes se tratan adicionalmente y se eliminan en el tratamiento 160 posterior.

En el método 300, la etapa 164 de reactor biológico está permanentemente fuera de la línea principal de tratamiento posterior, siendo la etapa de reactor en la que siempre tiene lugar el enriquecimiento del almacenamiento de carbono fácilmente biodegradable, pero integrada con la línea principal de tratamiento posterior a través del intercambio de microorganismos 161, 162 y 163, pero no el agua, entre las etapas 164 a 165 y 166 a 164 de reactor biológico y posiblemente entre las etapas 165 a 166 de reactor.

Después del enriquecimiento de carbono para los productos de almacenamiento, tales como PHA, los microorganismos 161 se transfieren de manera continua o intermitente a la etapa 165 de reactor con un dispositivo de transferencia que limita en gran medida la cantidad de agua traída con los microorganismos. Por ejemplo, los microorganismos 161 hechos crecer como una biopelícula sobre portadores 108 suspendidos (tales como portadores de MBBR) pueden, pero sin limitarse a, transferirse con una bomba de elevación de aire, en la que un portaobjetos perforado impide que el agua siga a los portadores 108 suspendidos hacia la etapa 165 de reactor. En esta etapa de reactor, el carbono orgánico almacenado, tal como los PHA, se usa para una variedad de actividades metabólicas diferentes, tal como se mencionó anteriormente, incluyendo la eliminación de microcontaminantes, la eliminación de nitrógeno y fósforo. El agua de salida de 165 puede descargarse como agua efluente (también denominada agua 170 tratada), pero preferible, tal como se ejemplifica en la figura 3, tratarse adicionalmente en una etapa 166 de reactor adicional.

Los microorganismos, tales como la biopelícula en los portadores 108 suspendidos, pueden transferirse de vuelta de la etapa 165 a la etapa 164 usando una bomba de elevación de aire, o similar, en el caso de que el agua de salida de 165 se descargue como agua efluente, pero preferible, tal como se ejemplifica en la figura 3, siga el agua hacia una etapa 166 de reactor adicional para su tratamiento adicional. La división en más de una etapa en la línea principal de tratamiento de microcontaminantes proporciona las ventajas de usar diferentes condiciones redox (aireadas o no aireadas), pero también proporciona los beneficios de optimizar las tasas de eliminación, en la que se obtiene una mayor tasa de eliminación a la(s) mayor(es) concentración/concentraciones de sustrato, similar a como se explicó previamente en el método 200 anterior. Desde la última etapa 166 de reactor, los portadores, pero no el agua, se transfieren de vuelta a la etapa 164 para un nuevo enriquecimiento del almacenamiento de carbono, y el agua efluente, separada de los portadores con tamices o similares, se descarga como agua efluente.

En una realización, los microorganismos 161, 162, 163 se hacen crecer sobre elementos (108) portadores suspendidos.

En una realización, los microorganismos 161, 162, 163, tales como bacterias que se hacen crecer sobre portadores 108, pueden transferirse de manera activa entre las etapas 164, 165 y 166 de reactor, sin transferencia de agua. Tal transferencia puede facilitarse mediante una bomba de elevación de aire, en la que un portaobjetos perforado elimina la mayor parte del agua de los portadores. En una realización adicional, los microorganismos 161, 162, 163, tales como bacterias que se hacen crecer sobre portadores 108, pueden transferirse entre las etapas 165 y 166 de reactor siguiendo el flujo de agua a través de los reactores.

En el método 400, se muestra un procedimiento de tratamiento de agua residual con eliminación de carbono, nitrificación y eliminación de microcontaminantes cambiando las posiciones de las etapas 164, 165, 166 de reactor (que contienen los microorganismos 161, 162, 163). Las figuras 4A-B ilustran un esquema de una realización usada en un estudio experimental de un procedimiento de agua residual usando el sistema según la presente invención, en el que el acceso alterno a compuestos de carbono fácilmente biodegradables se obtiene cambiando las posiciones de las etapas de reactor físicamente móviles que comprenden los microorganismos 161, 162 y 163 para el tratamiento de microcontaminantes, dentro y fuera de la corriente 106 secundaria y la corriente de agua 107 residual empobrecida. Las figuras 4 A y B muestran la configuración de un sistema de reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR) que funciona según la invención, en las que, en la figura 4A, dos MBBR 164, 165 están tratando el efluente de un agua residual municipal para la eliminación de microcontaminantes y un tercer reactor 166 está tratando temporalmente agua residual en bruto diluida que está expuesta a una fuente de carbono fácilmente biodegradable. Después de dos días de funcionamiento, tal como se observa en la figura 4B, el reactor 166 se mueve hacia la línea de tratamiento, redirigiendo el flujo de agua residual, y el reactor 164 se convierte en el segundo reactor en la línea. El reactor 165 se retira de la línea de tratamiento y se expone temporalmente a agua residual en bruto diluida. Después de otros 2 días de funcionamiento, tiene lugar un nuevo cambio, en el que el reactor 165 será el primero en

la línea que trata el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales.

En una realización, el tiempo de duración para la alimentación de los microorganismos para la eliminación de microcontaminantes con la corriente secundaria para el agua residual de la corriente 106 secundaria es de desde 5 minutos hasta 1 semana. Este amplio intervalo se debe a factores tales como que la captación real de carbono biodisponible por los microorganismos, tales como bacterias, es un proceso muy rápido. Por tanto, las duraciones de la alimentación en la escala de minutos, tal como 5 minutos de duración, serán suficiente para que funcione el método de la invención. Tal alimentación rápida es posible si los volúmenes de biorreactor son pequeños, o si los microorganismos se transfieren entre reactores, tal como en el sistema 300. El uso ciclos cortos de alimentación puede dar como resultado un crecimiento bacteriano más lento en comparación con el uso de ciclos de alimentación más largos. Si se usan grandes volúmenes de reactor y la concentración de nutrientes de la corriente secundaria es baja, la concentración de nutrientes puede aumentar en un gradiente. En tales casos, pueden obtenerse microorganismos viables para la eliminación de microcontaminantes con tiempos de alimentación tan largos como de una semana. El uso de ciclos largos de alimentación (>1 semana) puede dar como resultado la pérdida de la capacidad de degradación de los microcontaminantes del agua residual de la corriente 106 secundaria, en comparación con ciclos de alimentación más cortos. Para la mayoría de los sistemas, puede encontrarse que los tiempos de alimentación prácticos están en el intervalo de 10 minutos a 3 días, o entre 30 minutos y 2 días. Por tanto, en una realización, la duración de la etapa de alimentación (es decir, la etapa (d)) de los microorganismos 161, 162, 163 con la corriente 106 secundaria está entre 10 minutos y 3 días, o entre 30 minutos y 2 días. También puede requerirse un tiempo de alimentación más corto de los microorganismos en realizaciones cuando los microorganismos sobre portadores 108 suspendidos pueden moverse libremente con el flujo de agua, de un reactor a otro, tal como en realizaciones específicas del método 300. En un caso de este tipo, el movimiento de los portadores 108 suspendidos dependerá del flujo de agua, y puede que los portadores 108 suspendidos tengan que moverse después de tan solo 30 minutos para mantener una distribución uniforme en los reactores.

#### Resultados experimentales

Las figuras 5A-B presentan datos de un estudio experimental sobre la eliminación de microcontaminantes a lo largo del tiempo cuando se añaden adiciones conocidas con diferentes compuestos microcontaminantes en ensayos por lotes para reactores de biopelícula de lecho móvil (MBBR) que funcionan según la invención. La leyenda A, B y C representa el reactor A, B y C, respectivamente. Durante dos días antes del ensayo por lotes, el reactor A se alimentó con el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales, luego el efluente del reactor A entró en el reactor B. El reactor se alimentó C con agua residual en bruto diluida. El sistema 160 de tratamiento de microcontaminantes se pobló usando bacterias de un MBBR que se hizo funcionar con agua residual de un hospital. El efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales, que representa la salida de la etapa 150 (es decir, el agua 107 residual empobrecida), se trató en un sistema de MBBR de tres etapas, en el que un MBBR estuvo siempre expuesto de manera alterna a una fuente de carbono fácilmente biodegradable de agua residual biológica no tratada (es decir, la corriente 106 secundaria), tal como se observa en la figura 4. Tres veces por semana, se realizó un cambio en la posición en la que el MBBR que se había hecho funcionar con agua residual en bruto diluida se colocó primero en la línea de eliminación de microcontaminantes, el primer MBBR previamente se movió a la segunda posición y el último MBBR se retiró de la línea de eliminación de microcontaminantes, a tratamiento temporal de agua residual en bruto diluida. Después de 4 meses de funcionamiento continuo, se realizaron ensayos por lotes en los que se añadieron 17 productos farmacéuticos recalcitrantes con adiciones conocidas (3,43-19,32 ug/l). Los productos farmacéuticos se seleccionaron de microcontaminantes comunes a menudo presentes en agua residual municipal. La figura 5 muestra el ajuste de la cinética de primer orden de gráficos de concentración de productos farmacéuticos en los ensayos por lotes. 14 de los 17 compuestos se degradaron a más del 20%.

Las figuras 6A-B presentan datos de un estudio experimental sobre la eliminación de microcontaminantes que compara las constantes de velocidad de eliminación de los ensayos por lotes cuando se añaden adiciones conocidas con diferentes compuestos microcontaminantes a MBBR que funcionan según la invención y cuando funcionan según un modo de referencia. En este estudio, (C), (A) y (B) representan los mismos tres MBBR diferentes cuando se hacen funcionar según la invención. Durante dos días antes del ensayo por lotes, A era el primer reactor en serie y B era el segundo reactor y C era el que recibía agua residual en bruto diluida.

Después del ensayo por lotes, se mantuvieron dos de los MBBR en funcionamiento continuo en serie con la misma fuente de efluente, pero sin ningún cambio temporal a una fuente de carbono fácilmente biodegradable de agua residual en bruto diluida biológica no tratada y manteniendo la misma posición en la línea de tratamiento, estando siempre uno de los MBBR primero en la línea y el otro MBBR siempre el segundo en la línea que recibe el agua efluente del primer MBBR. Este esquema de funcionamiento representa un modo de funcionamiento de referencia para la invención. Después de 5 semanas de funcionamiento en el modo de referencia, se realizó un nuevo ensayo por lotes, en el que se determinaron las tasas de eliminación para los diferentes microcontaminantes ("Este experimento (control)", A y B).

Las constantes de velocidad de eliminación para los 15 microcontaminantes diferentes determinadas en los ensayos por lotes se presentan en las figuras 6A-B, en los que los resultados se obtuvieron tanto cuando los MBBR se

hicieron funcionar según la invención como cuando el funcionamiento se realizó en el modo de referencia. Los resultados mostraron una tasa de eliminación generalmente mayor para los tres sistemas de biomasa cuando se hicieron funcionar según la invención, esto indica una mayor disponibilidad de biomasa o carbono activo para el cometabolismo. La degradación de compuestos normalmente difíciles de degradar biológicamente, tal como diclofenaco, demostró ser significativamente mayor que la que se logra en sistemas de tratamiento de aguas residuales biológicas tradicionales. Cuando se hace funcionar en el modo de referencia en serie, las constantes de velocidad, en general, caen de manera significativa en el segundo reactor, que no es el caso cuando el funcionamiento se realiza según la invención. Esto indica una falta de biomasa o carbono activo para el cometabolismo. Por tanto, la tasa de eliminación global para un sistema de MBBR fue mayor cuando se hizo funcionar según la invención.

Por tanto, resulta evidente que el método según la invención hace posible no sólo mantener, sino también cultivar microorganismos sanos (biomasa) en la etapa 160 de tratamiento de microcontaminantes, purificando el agua residual empobrecida (bajo contenido de nutrientes). De manera más emocionante, esto no conlleva una disminución en las propiedades de eliminación de microcontaminantes de los microorganismos, sino que el método de la invención mejora las propiedades de los microorganismos para la eliminación de microcontaminantes en el agua 107 residual empobrecida.

A pesar de que la presente invención se ha descrito anteriormente con referencia a realizaciones específicas, no pretende limitarse a la forma específica expuesta en el presente documento. Más bien, la invención se limita sólo por las reivindicaciones adjuntas.

En las reivindicaciones, el término "comprende/que comprende" no excluye la presencia de otros elementos u otras etapas. Además, aunque se enumeren individualmente, puede implementarse una pluralidad de medios, elementos o etapas del método mediante, por ejemplo, una sola unidad o procesador. De manera adicional, aunque pueden incluirse características individuales en diferentes reivindicaciones, estas posiblemente pueden combinarse de manera ventajosa, y la inclusión en diferentes reivindicaciones no implica que una combinación de características no sea factible y/o ventajosa. Además, las referencias en singular no excluyen una pluralidad. Los términos "un", "una", "primero", "segundo", etc., no excluyen una pluralidad. Los signos de referencia en las reivindicaciones se proporcionan simplemente como ejemplo aclaratorio y no deben interpretarse como limitativos del alcance de las reivindicaciones en modo alguno.

## REIVINDICACIONES

1. Método (200, 300, 400) de eliminación, al menos parcialmente, de al menos un microcontaminante de agua (104) residual que comprenden compuestos carbonosos y al menos un microcontaminante, comprendiendo el método las etapas de:
  - (a) dividir el agua (104) residual en una corriente (105) principal y una corriente (106) secundaria;
  - (b) tratar la corriente (105) principal con bacterias para reducir el contenido de compuestos carbonosos para proporcionar agua (107) residual empobrecida que comprende al menos un microcontaminante;
  - (c) tratar el agua (107) residual empobrecida con una segunda porción de microorganismos (162), que tienen la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante, para eliminar, al menos parcialmente, el al menos un microcontaminante proporcionando de ese modo agua (170) tratada, en el que la segunda porción de microorganismos (162) se ha enriquecido alimentando la corriente (106) secundaria a la misma antes de usar la segunda porción de microorganismos (162) en el tratamiento del agua (107) residual empobrecida;
  - (d) alimentar una primera porción de microorganismos (161), que tienen la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante, con la corriente (106) secundaria, para enriquecerlas para su uso posterior en el tratamiento del agua (107) residual empobrecida para eliminar, al menos parcialmente, el al menos un microcontaminante; y

en el que la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del agua residual de la corriente (106) secundaria es mayor de 100 g de  $O_2/m^3/5$  d y el agua (107) residual empobrecida tiene una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 0 a 50 g de  $O_2/m^3/5$  d.
2. Método (200, 300, 400) según la reivindicación 1, en el que la etapa (b) comprende:
  - i.) tratar la corriente (105) principal con bacterias (130) para eliminar los compuestos orgánicos;
  - ii.) tratar la corriente (105) principal con bacterias en condiciones (140) aerobias para oxidar el  $NH_4^+$  para dar  $NO_3^-$ ; y/o
  - iii.) tratar la corriente (105) principal con bacterias en condiciones (150) anóxicas para convertir el  $NO_3^-$  en  $N_2$ .
3. Método según la reivindicación 2, en el que la etapa (b) comprende las etapas consecutivas de:
  - i.) tratar la corriente (105) principal con bacterias (130) para eliminar los compuestos orgánicos;
  - ii.) tratar la corriente resultante de la etapa i) con bacterias en condiciones (140) aerobias para oxidar el  $NH_4^+$  para dar  $NO_3^-$ ; y
  - iii.) tratar la corriente resultante de la etapa ii) con bacterias en condiciones (150) anóxicas para convertir el  $NO_3^-$  en  $N_2$ .
4. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el método comprende tratar el agua (107) residual empobrecida con una segunda porción de microorganismos (162) en serie con una tercera porción de microorganismos (163), que tienen ambas la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante, proporcionando de ese modo agua (170) tratada, mientras que la primera porción de microorganismos (161) está enriqueciéndose mediante la alimentación con la corriente (106) secundaria.
5. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que las porciones de microorganismos (161, 162, 163) que tienen la capacidad de degradar el al menos un microcontaminante son o bien aireadas o bien no aireadas, o una combinación de aireadas y no aireadas.
6. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la corriente (106) secundaria se retroalimenta a la corriente (105) principal en la etapa (b) para el tratamiento con bacterias para reducir el contenido de compuestos carbonosos, después de que la corriente (106) secundaria se haya usado para alimentar a los microorganismos (161, 162 ó 163) en la etapa (d).
7. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que los microorganismos (161, 162, 163) se hacen crecer sobre elementos (108) portadores suspendidos.
8. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el método comprende al

- 5 menos dos ciclos, en el primer ciclo la segunda porción de microorganismos (162) se usa para tratar el agua (107) residual empobrecida, mientras que la primera porción de microorganismos (161) se usa para tratar la corriente (106) secundaria, y en el segundo ciclo la primera porción de microorganismos (161) se usa para tratar el agua (107) residual empobrecida, mientras que la segunda porción de microorganismos (162) se usa para tratar la corriente (106) secundaria.
9. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el método comprende al menos tres ciclos. En el primer ciclo, la segunda porción de microorganismos (162) seguido por la tercera porción de microorganismos (163) se usan para tratar el agua (107) residual empobrecida, mientras que la primera porción de microorganismos (161) se usa para tratar la corriente (106) secundaria. En el segundo ciclo, la primera porción de microorganismos (161) seguido por la segunda porción de microorganismos (162) se usan para tratar el agua (107) residual empobrecida, mientras que la tercera porción de microorganismos (163) se usa para tratar la corriente (106) secundaria. En el tercer ciclo, la tercera porción de microorganismos (163) seguido por la primera porción de microorganismos (161) se usan para tratar el agua (107) residual empobrecida, mientras que la segunda porción de microorganismos (162) se usa para tratar la corriente (106) secundaria.
10. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que el método comprende al menos dos etapas (164 y 165) de reactor diferentes, preferiblemente al menos tres etapas (164, 165 y 166) de reactor diferentes, para su uso en las etapas (c) y (d) según la reivindicación 1.
11. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el al menos un microcontaminante se selecciona del grupo que consiste en: productos farmacéuticos o metabolitos de productos farmacéuticos, tales como hormonas sintéticas, calmantes, reguladores de lípidos, bloqueantes  $\beta$ , antibióticos, antidepresivos, analgésicos, antiepilépticos o psicoestimulantes; productos médicos, tales como agentes de contraste radiológico (medios de contraste yodados para rayos X); productos farmacéuticos veterinarios, tales como hormonas o antibióticos; aditivos de piensos para animales, tales como potenciadores del crecimiento; productos de higiene personal (PCP), tales como protectores solares/UV, antioxidantes, conservantes, antimicrobianos, nitroalmizcles y almizcles policíclicos, subproductos de desinfección o repelentes contra insectos; biocidas, tales como herbicidas, insecticidas, fungicidas o biocidas; o productos químicos industriales, tales como retardantes de llama, antioxidantes, plastificantes, complejos de coordinación, inhibidores de la corrosión, refrigerantes, productos de incineración.
12. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que el al menos un microcontaminante se selecciona del grupo que consiste en sulfadiazinas (sulfametoxazol, AC-sulfadiazina, sulfadiazina), diclofenaco, propranolol, sulfametizol, venlafaxina, carbamazepina, iopromida, iohexol, iopamidol, iomeprol, citalopram, atenolol, metoprolol, propranolol, sotalol, trimetoprima, ciprofloxacina, tramadol, 17 $\alpha$ -etinilestradiol, clarotromicina, eritromicina, roxitromicina, ácido diatrizoico, fenazona, 17 $\alpha$ -etinilestradiolibuprofeno, naproxeno, bezafibrato, ácido fenofibrico, ácido clofibrico, cafeína, exiopromida, acetato de trembolona, tetraciclinas, cloramfenicol, roxarsona arsénica, metilbencilidenalcanfor (4-MBC), ácido hidroxibenzoico, triclosán, Tonalide (AHTN), N-nitrosodimetil-amina (NDMA), N,N-dietil-metatuamida (DEET), alaclor, atrazina, bentazona, 2,4 D, diurón, carbarilo, dieldrina, diclorodifeniltricloroetano (DDT), vinclozolin tributilestaño (TBT), difenil éteres bromados (PBDE), nonilfenol (NP), bisfenol A, ácido perfluorooctanosulfónico (PFOS), ácido perfluorooctanoico (PFOA), hidroxianisol butilado (BHA), ftalato de dietilo (DEP), ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), benzotriazol (BTSA), dioxinas e hidrocarburos poliaromáticos (PAH).
13. Método (200, 300, 400) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en el que se añade un aditivo de carbono, tal como metanol o etanol, al agua residual de la corriente (106) secundaria de la etapa (a), para ajustar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) a más de 100 g de O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/5 d.

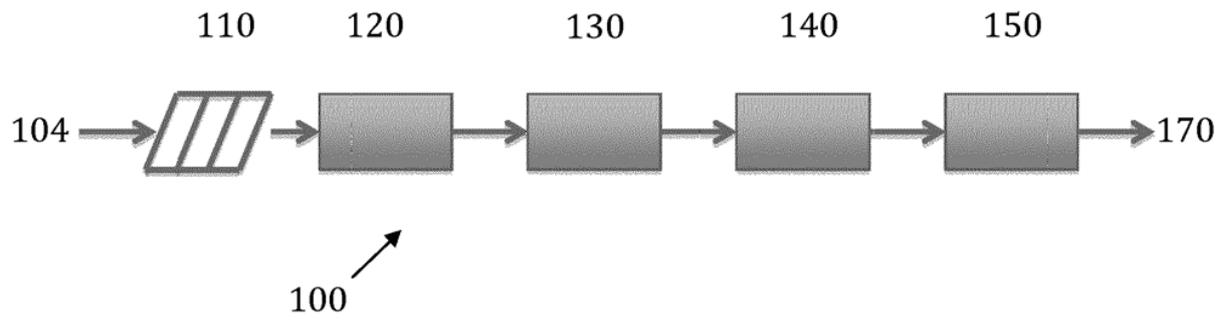


Figura 1

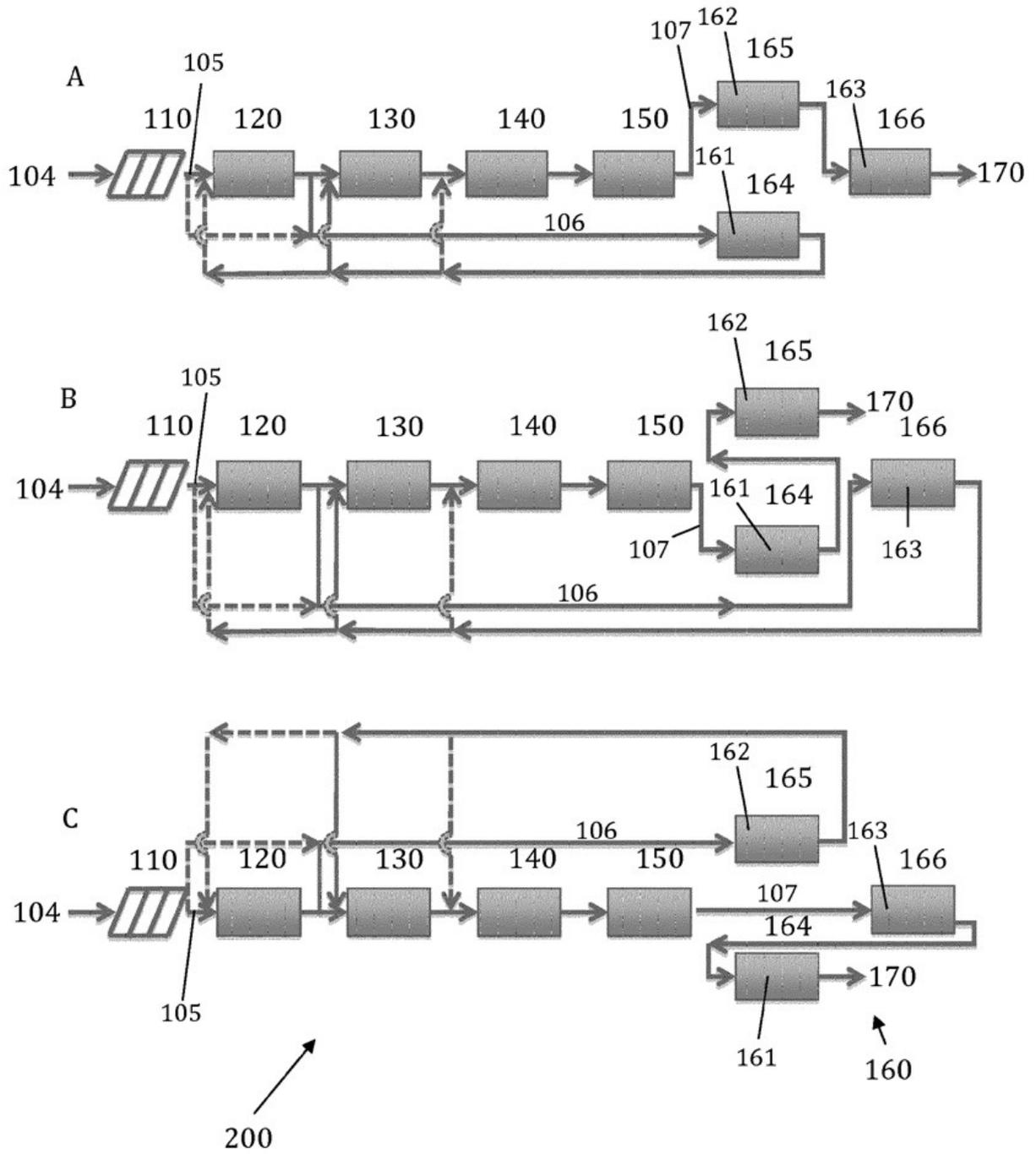


Figura 2

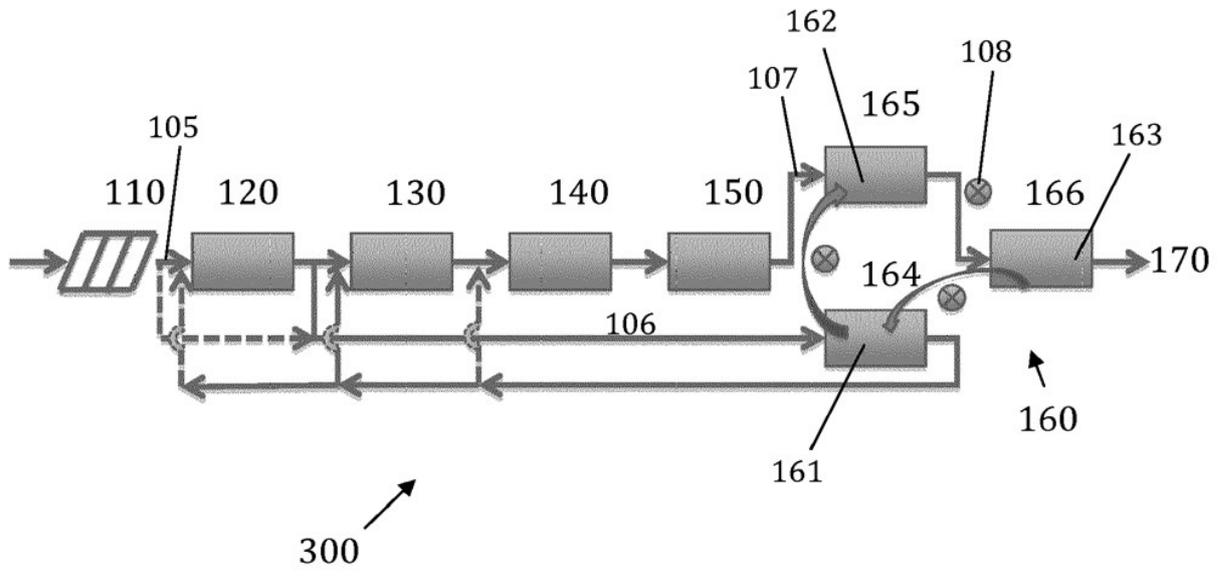


Figura 3

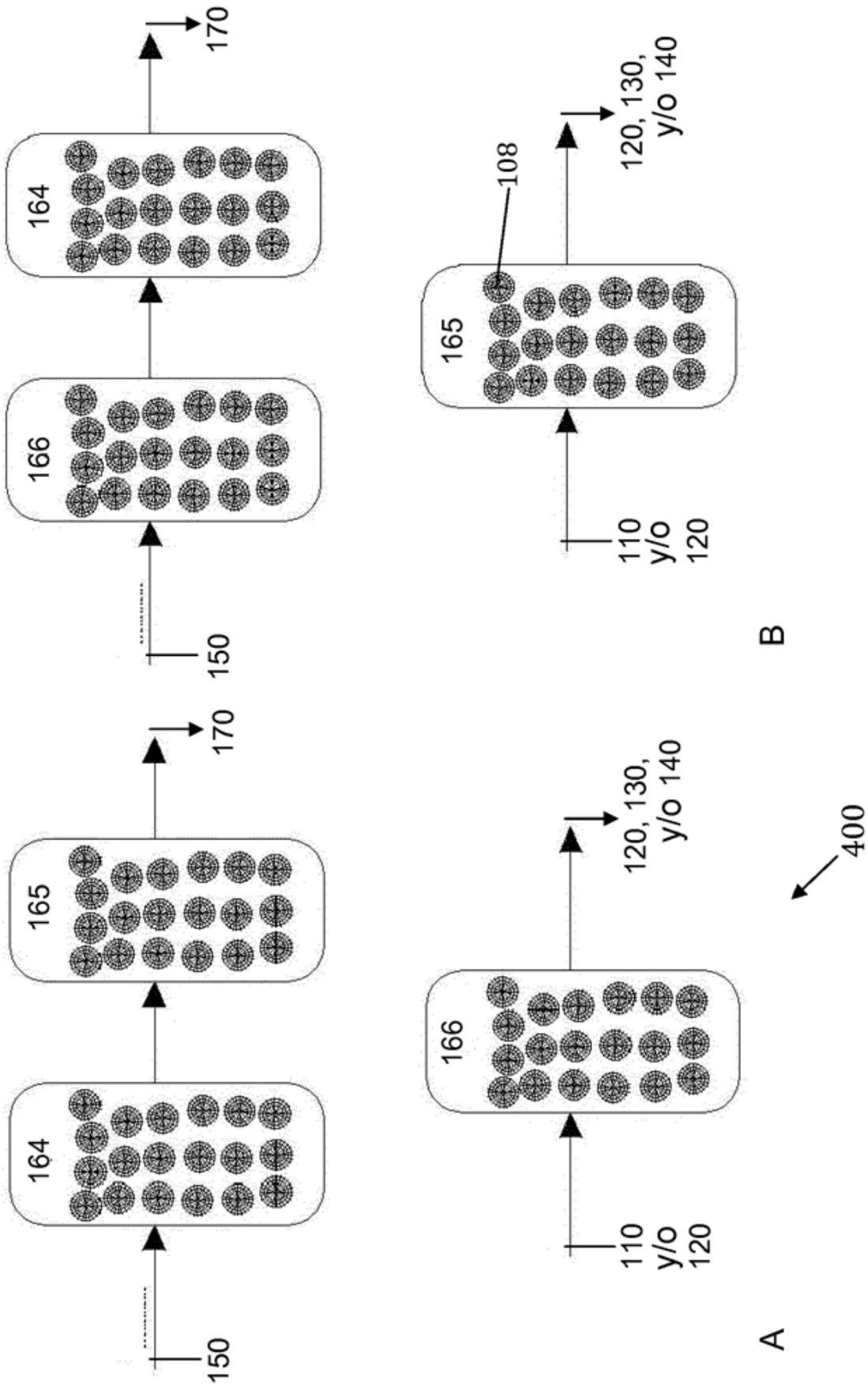
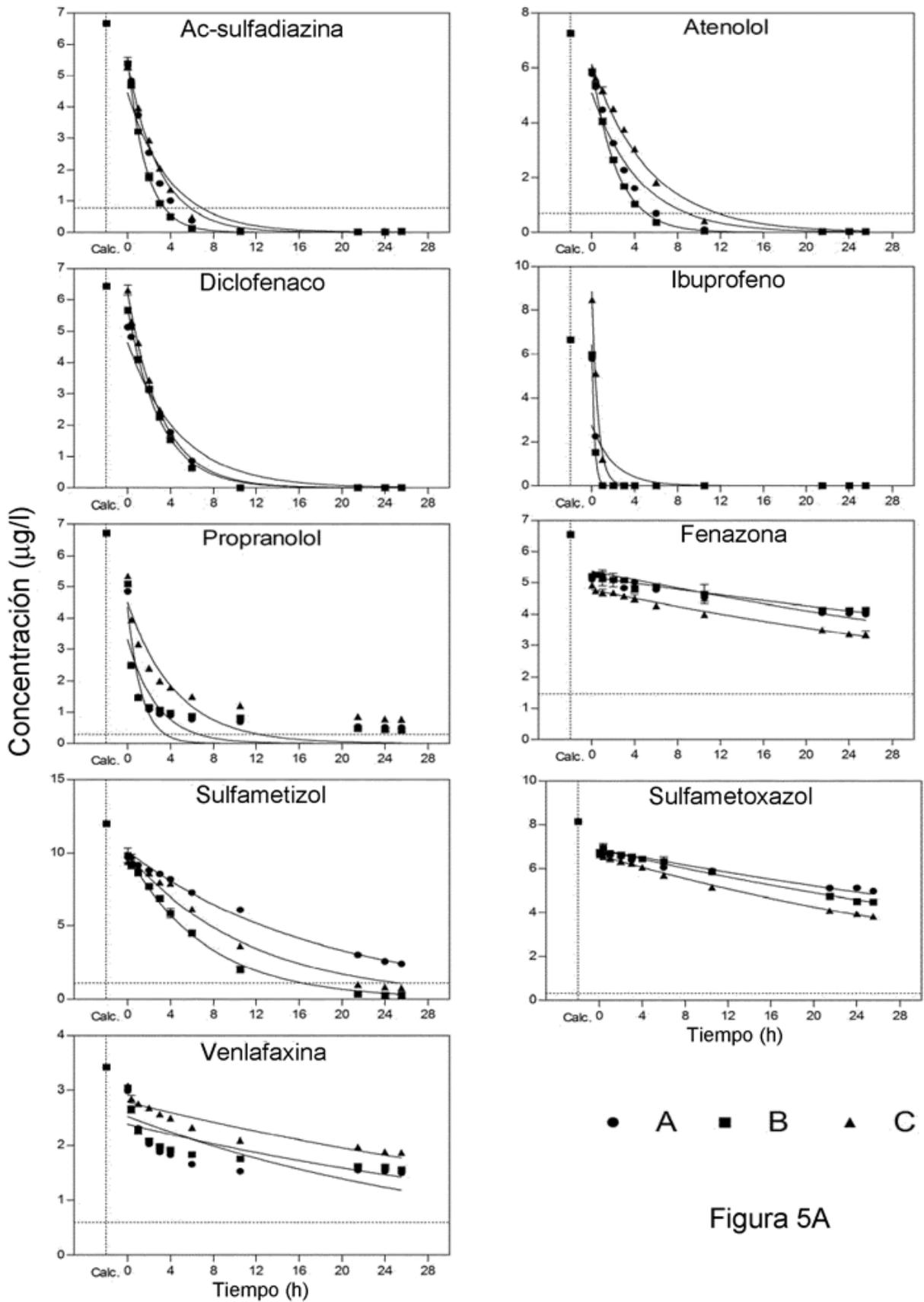
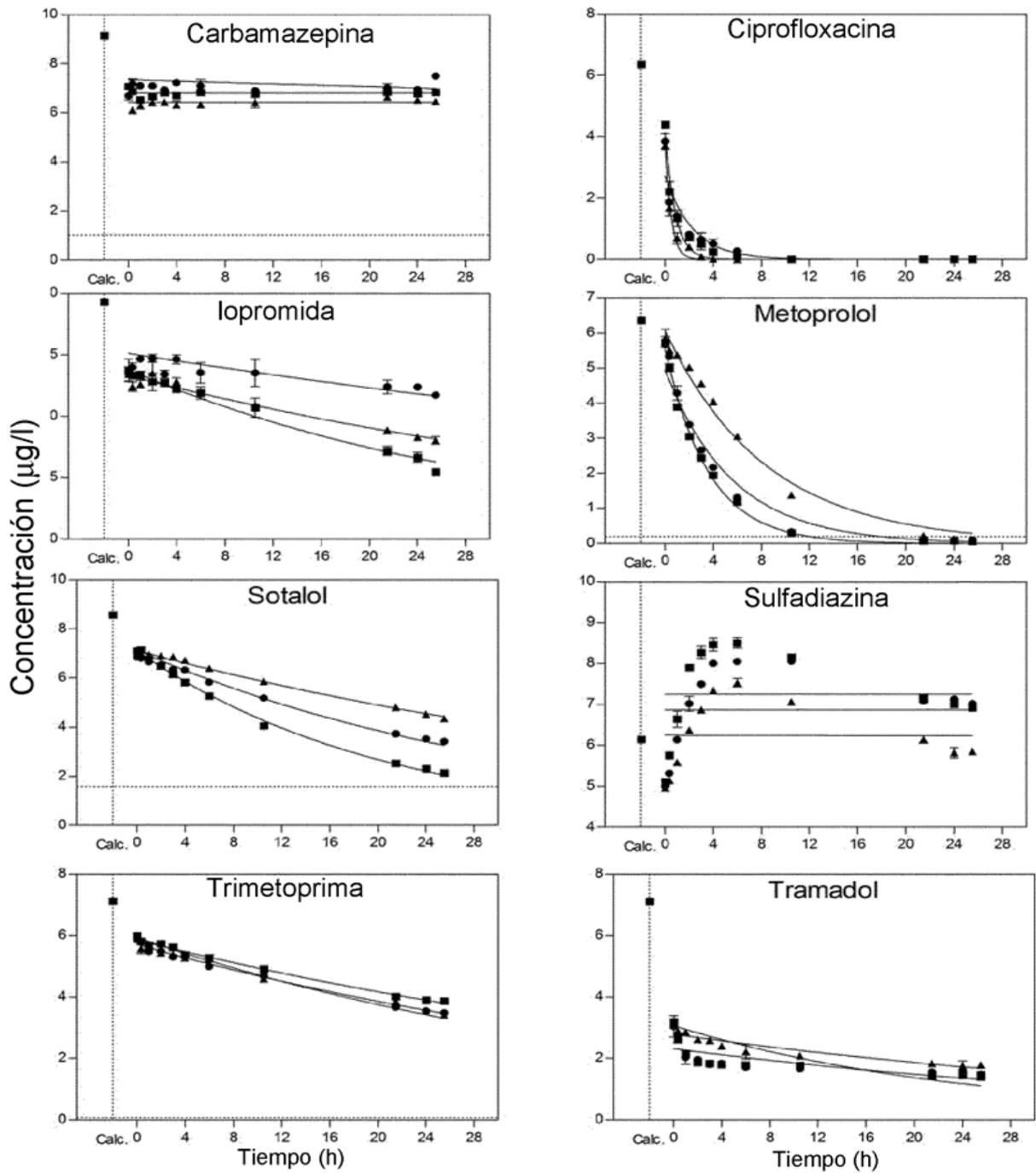


Figura 4





• A ■ B ▲ C

Figura 5B

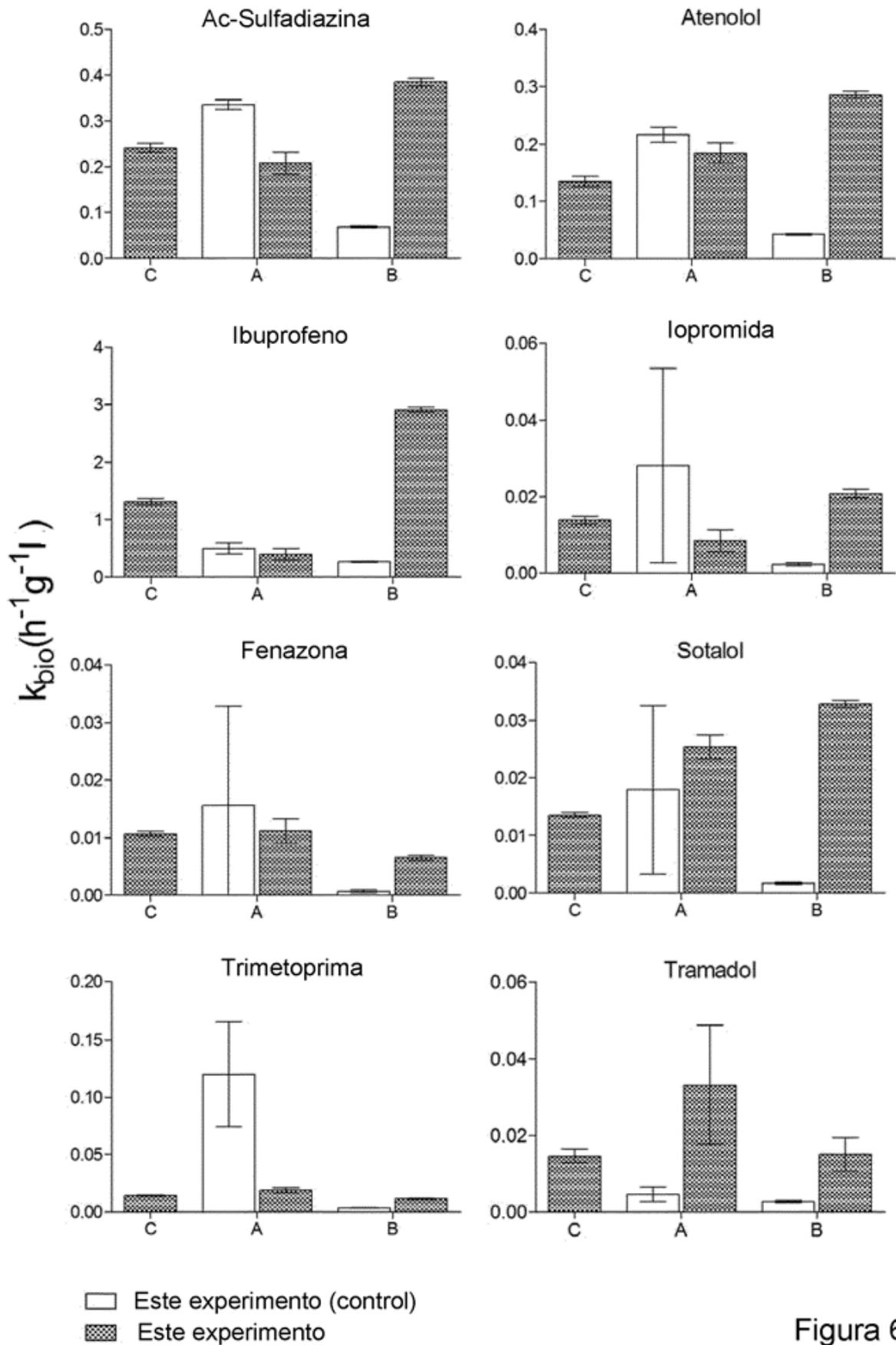


Figura 6A

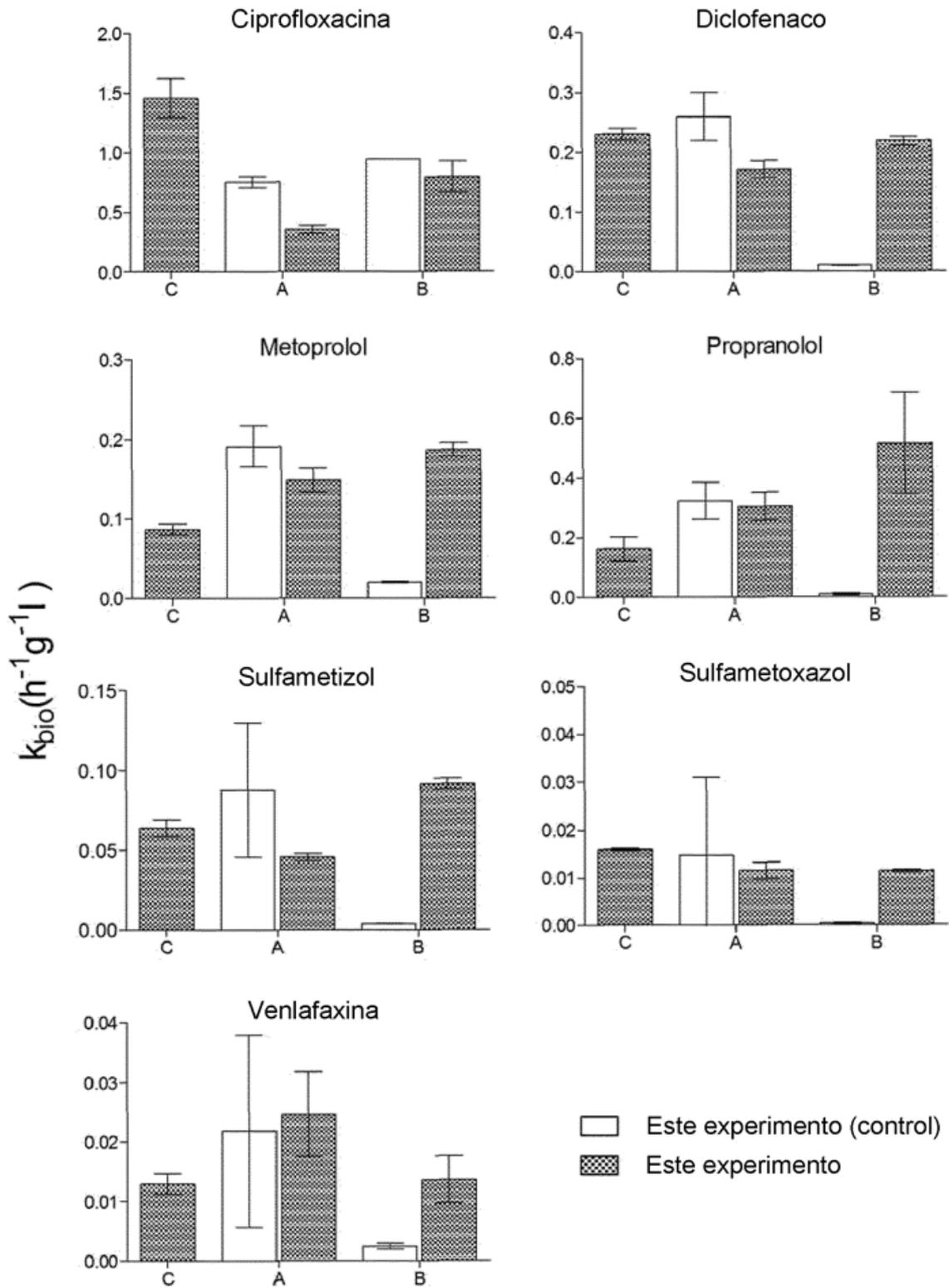


Figura 6B