



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

CONTAMINANTES EMERGENTES: CONCEPTOS BÁSICOS, IMPACTO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

Marcela Levío-Raimán / Paola Fincheira / Marjorie Reyes / M. Cristina Diez



Universidad de Concepción

Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Contaminantes emergentes: conceptos básicos,
impacto en los recursos hídricos y alternativas de tratamiento.

Marcela Levío-Raimán, Paola Fincheira,

Marjorie Reyes y M. Cristina Diez.

Diciembre 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

CONTAMINANTES EMERGENTES: CONCEPTOS BÁSICOS, IMPACTO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

Marcela Levío-Raimán / Paola Fincheira / Marjorie Reyes / M. Cristina Diez



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Marcela Levío-Raimán

Ingeniero Civil Industrial mención Bioprocesos.
Doctor en Ciencias de Recursos Naturales,
Universidad de La Frontera.
Centro de Excelencia en Investigación Biotecnológica
Aplicada al Medio Ambiente (CIBAMA)
Universidad de La Frontera.
Colaborador CRHIAM.



Paola Fincheira

Biotecnólogo.
Doctor en Ciencias de Recursos Naturales,
Universidad de La Frontera.
Centro de Excelencia en Investigación Biotecnológica
Aplicada al Medio Ambiente (CIBAMA),
Universidad de La Frontera.



Marjorie Reyes

Bióloga.
Doctor en Ciencias Biológicas,
Universidad de Concepción.
Profesor Asociado, Departamento de Ciencias
Químicas y Recursos Naturales,
Universidad de La Frontera.
Investigador Asociado CRHIAM.



M. Cristina Diez

Químico Laboratorista.
Doctor en Ciencias de Alimentos, Universidad Estatal de
Campinas, SP, Brasil.
Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Química,
Universidad de La Frontera.
Subdirectora Centro de Excelencia en Investigación
Biotecnológica Aplicada al Medio Ambiente (CIBAMA),
Universidad de La Frontera.
Investigador Principal CRHIAM.

RESUMEN

El agua es un recurso esencial para la vida en el planeta y juega un rol muy importante en los procesos vitales de los seres vivos. Sin embargo, el continuo crecimiento de la población mundial, el aumento de la actividad industrial y diversas actividades domésticas han influido en la calidad del agua, generando contaminación y afectando los ecosistemas. En este sentido, se ha evidenciado la presencia de nuevos contaminantes, llamados "contaminantes emergentes", en aguas superficiales y subterráneas, impactando adversamente a los seres vivos presentes en el ecosistema.

Los contaminantes emergentes corresponden a sustancias o compuestos de distinto origen y naturaleza química presentes en el ecosistema, que han sido descubiertos recientemente y han derivado del uso intensivo de productos químicos en actividades cotidianas e industriales, generando contaminación en diversas matrices ambientales. Entre ellos destacan productos farmacéuticos y de cuidado personal, plaguicidas, productos veterinarios, subproductos industriales, tensioactivos, entre otros. Si bien estos productos han ayudado a mejorar la calidad de vida de las personas, la salud humana y la producción de alimentos a nivel mundial, su efecto sobre los recursos hídricos ha sido inminente, encontrándose residuos de estos productos en aguas superficiales y subterráneas, lo que afecta los ecosistemas naturales.

Por lo tanto, el objetivo de esta serie comunicacional CRHIAM es entregar información y antecedentes sobre los contaminantes emergentes, clasificación, tipos, fuentes de contaminación, interacción con el medio ambiente y su impacto, para finalmente, describir algunas tecnologías que permiten remover estos compuestos del recurso hídrico. De esta forma, pretendemos aportar al conocimiento del público en general y entregar algunas consideraciones a las autoridades para la discusión de políticas públicas en torno al manejo y tratamiento de este tipo de contaminantes.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural esencial para la vida y todos los procesos que se llevan a cabo en los ecosistemas. Es fundamental en la síntesis y estructura de las células, el transporte de nutrientes, así como también en procesos metabólicos, bioquímicos, fisiológicos y químicos que se llevan a cabo en los seres vivos. A nivel mundial, el 70% de la superficie del planeta se encuentra cubierta por agua, pero solo el 2,5% se encuentra en forma de agua dulce disponible para los seres vivos y el 97,5% restante, corresponde a agua salada.

El agua se clasifica generalmente en aguas superficiales y aguas subterráneas. El agua superficial se refiere a ríos, arroyos, embalses, lagos y estanques, los cuales se encuentran expuestos directamente a la superficie terrestre y a la atmósfera. En cambio, el agua subterránea se encuentra en unidades de roca porosa debajo de la superficie terrestre, la cual puede estar en contacto con agua superficial o aislada. Ambos tipos de agua interactúan a través de matrices del suelo y se utilizan para el consumo humano bajo estrictos requisitos sanitarios. Sin embargo, la calidad y disponibilidad del agua se ha visto afectada por el continuo crecimiento demográfico, las actividades industriales y las actividades domésticas a nivel mundial. Adicional a esto, se ha reportado que el contacto de aguas superficiales con residuos provenientes de la industria urbana y prácticas agrícolas causan importantes problemas de suministro (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017). Por otra parte, efectos derivados del cambio climático han causado escasez y sobreexplotación de recursos hídricos en muchos lugares del mundo. En este sentido, se ha evidenciado que los recursos hídricos de países desarrollados se encuentran expuestos a contaminantes industriales y en los países en desarrollo, a contaminantes derivados de prácticas agrícolas. En la Figura 1, se muestra la distribución de las aguas presentes en nuestro planeta y los factores que afectan la disponibilidad de agua a nivel mundial.



Figura 1.

Distribución de agua en el planeta, factores que afectan su disponibilidad y la aparición de nuevos contaminantes. Fuente: Elaboración propia.

Los procesos de urbanización e industrialización han incrementado la diversidad, concentración, cantidad y tipos de contaminantes. Particularmente, se ha reportado un aumento en la incidencia de contaminación de aguas subterráneas debido a:

- La descarga inadecuada de residuos municipales e industriales
- La aplicación de aguas residuales en forma de riego
- La movilización de contaminantes debido a propiedades físico-químicas del suelo

Por lo tanto, hay una gran cantidad y variedad de compuestos y elementos artificiales que contaminan los recursos hídricos debido a la masificación de productos químicos y al actual estilo de vida de la población humana. Estos contaminantes pueden ser clasificados según la fuente u origen, según puntuales o difusos, los cuales se describen a continuación.

- Contaminantes de origen puntual se refiere a fuentes de fácil detección y control. Ejemplos de ello son plantas de tratamiento de aguas, plantas de tratamiento de residuos industriales líquidos, hospitales, entre otros.
- Contaminantes de origen difuso se refieren a aquellos cuyas fuentes u origen son de difícil detección y control. Ejemplos de ello son: lixiviación de fertilizantes inorgánicos, plaguicidas en aguas superficiales y subterráneas producto de la lluvia, la infiltración en el suelo y la escorrentía superficial en terrenos agrícolas.

Sin embargo, como una consecuencia de la intensiva actividad humana e industrial, ha surgido una nueva clasificación de contaminantes, los llamados "contaminantes emergentes". Estos contaminantes emergentes corresponden a compuestos o sustancias de diferente origen químico, cuyos efectos e impactos en el medio ambiente han sido poco estudiados pero pueden causar graves problemas en los sistemas acuáticos y ecosistemas, debido su concentración, diversidad y naturaleza química. Entre ellos destacan productos farmacéuticos y de cuidado personal, plaguicidas, productos veterinarios, subproductos industriales, tensioactivos, entre otros.

Es por ello que, considerando el escenario descrito anteriormente, existe un gran desafío a nivel mundial para mitigar la escasez del agua, así como también para reducir la cantidad y concentración de contaminantes descargados en el aguas superficiales y subterráneas para reducir la contaminación del recurso hídrico.

¿QUÉ SON LOS CONTAMINANTES EMERGENTES?

Los contaminantes emergentes son compuestos o sustancias de diferente origen químico, cuyos efectos e impacto en el medio ambiente han sido poco estudiados. De acuerdo a lo definido por la Red NORMAN, los contaminantes emergentes son sustancias que actualmente no se encuentran incluidas en programas rutinarios de monitoreo ambiental, pero que debería analizarse su incorporación bajo futuras legislaciones, debido a sus efectos adversos y/o persistencia en el ecosistema y medio ambiente (Zandaryaa & Frank-Kamenetsky, 2021). El concepto de contaminantes emergentes aplica para compuestos contaminantes presentes en el ecosistema recientemente descubiertos y cuya presencia en el agua ha derivado del uso intensivo de productos químicos en actividades cotidianas.

Estos contaminantes se caracterizan por tener un gran potencial para ingresar al medio ambiente y causar efectos adversos a nivel ecológico y la salud humana. En este sentido, a pesar de que se desconoce su impacto en los seres vivos, algunos estudios han revelado sus efectos adversos en la vitalidad, reproducción y duración de la vida de algunas especies anfibias.

Los contaminantes emergentes derivan principalmente de residuos de tipo doméstico, efluentes líquidos o vertidos domésticos que, finalmente, llegan a plantas de tratamiento de aguas residuales. De hecho, se han detectado concentraciones de contaminantes emergentes del rango de ng L^{-1} (nanogramos por litro) hasta $\mu\text{g L}^{-1}$ (microgramos por litro) en aguas residuales antes y después de ser tratadas (Vasilachi *et al.*, 2021). Por lo tanto, la composición y concentración de estos contaminantes en los recursos hídricos es variable y dependerá de las características de la población, sistemas de recolección del agua residual y sistemas de tratamiento. De acuerdo a la información entregada por el grupo de redes NORMAN, se han detectado alrededor de 970 tipos de contaminantes emergentes durante la última década en fuentes fluviales. Además, considerando el crecimiento y desarrollo a nivel mundial, se estima que la emisión de contaminantes emergentes continuará y aumentará a través del tiempo, por lo cual se deben implementar nuevas estrategias que permitan asegurar la calidad de los recursos hídricos. En la Figura 2, se presentan algunos ejemplos de contaminantes emergentes que se han detectado en aguas superficiales y subterráneas.

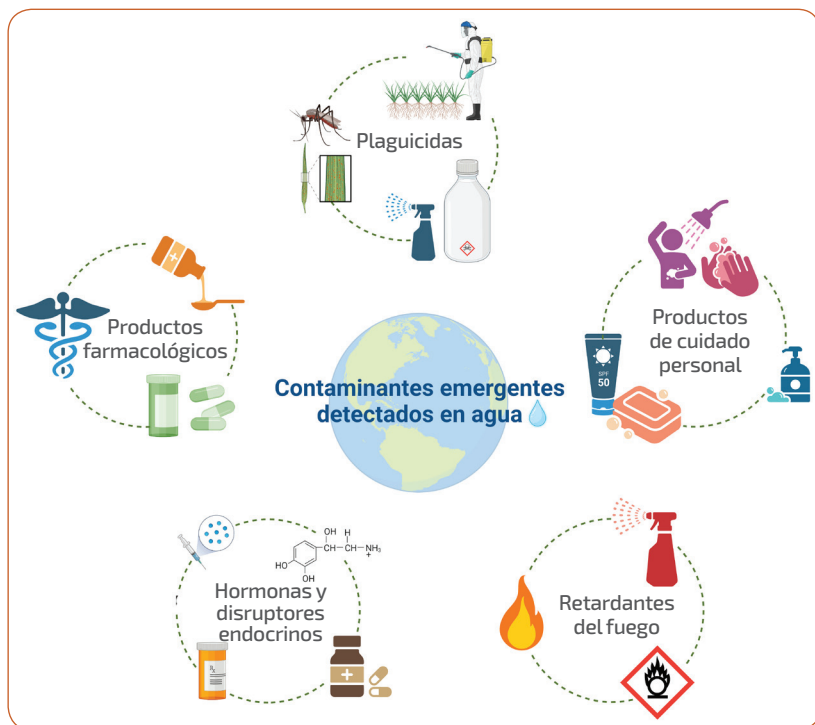


Figura 2.

Ejemplos de contaminantes emergentes detectados en agua.

Fuente: Elaboración propia.

La interacción de los diferentes tipos de contaminantes emergentes en el agua, depende principalmente de las propiedades físico-químicas del compuesto involucrado, entre las cuales destacan: la volatilidad, adsorción (adhesión), persistencia, polaridad, solubilidad, entre otros (Figura 3). Estos parámetros influyen en la biodegradación, transporte en el medio acuoso y su transformación en aguas subterráneas y superficiales. Específicamente, la biodegradación natural de los contaminantes emergentes puede variar significativamente entre los diversos compuestos, siendo altamente desconocido en hormonas, detergentes, y productos farmacéuticos. Adicionalmente, productos intermedios y finales de la degradación de los compuestos pueden resultar perjudiciales para el ecosistema y salud humana.

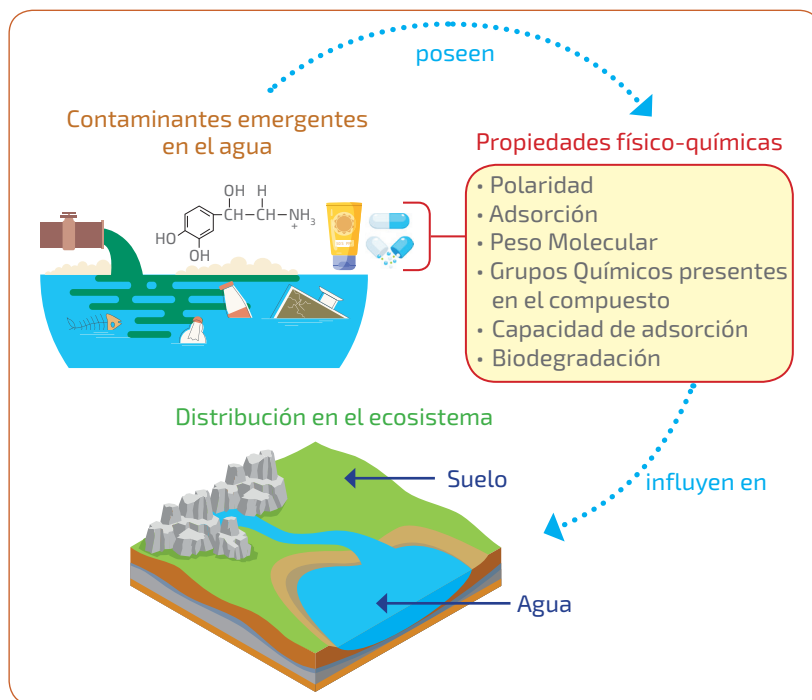


Figura 3.

Propiedades fisicoquímicas de contaminantes emergentes que influyen en su distribución en el ecosistema. Fuente: Elaboración propia.

En Chile, la normativa actual no fija los límites máximos permitidos de estos contaminantes emergentes (excepto plaguicidas en la Norma Chilena 1333, que fija requisitos de calidad de agua para diferentes usos). Por lo tanto, conocer su comportamiento, monitorear su actividad e identificar las fuentes de contaminación es de gran relevancia para evitar efectos negativos en el medio ambiente.

FUENTES DE CONTAMINANTES EMERGENTES

Las fuentes de contaminantes emergentes se pueden clasificar principalmente en dos, fuentes puntuales y difusas.

Las **fuentes puntuales** corresponden aquellas que se originan en una ubicación geográfica discreta, y cuya extensión de contaminación es acotada. Algunos ejemplos de fuentes puntuales son los hospitales, plantas de procesamiento de alimentos, fábricas, plantas de tratamientos de aguas residuales, plantas de extracción de recursos mineros, vertederos y fosas sépticas enterradas (Figura 4a). Particularmente, las aguas residuales son las fuentes puntuales más importantes de contaminantes emergentes, concentrando el mayor número de estudios y preocupación a nivel mundial.

Las **fuentes difusas** corresponden a aquellas que se originan en regiones o puntos poco definidos, lo cual implica un efecto de gran magnitud geográfica. Los contaminantes emergentes derivados de fuentes difusas tienen un impacto ambiental más bajo comparado con las fuentes puntuales y tienen un mayor potencial de atenuación en el suelo. Algunos ejemplos son la escorrentía de biosólidos y estiércol, escorrentías urbanas, recarga de acuíferos y fugas del sistema de alcantarillado (Figura 4b).



Figura 4.

Fuentes de contaminantes emergentes: fuentes (a) puntuales y (b) difusas.
Fuente: Elaboración propia.

CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE CONTAMINANTES EMERGENTES

Existe una gran variedad de contaminantes emergentes, entre los que destacan productos farmacéuticos y de cuidado personal, retardadores de fuego, plaguicidas, productos veterinarios, productos y subproductos industriales, aditivos alimentarios, tensioactivos, plastificantes, productos de desinfección, filtros de UV, surfactantes, antimicrobianos, antibióticos, y bacterias y genes resistentes a antibióticos, entre otros. A continuación, en la Tabla 1, se muestran los principales contaminantes emergentes, su clasificación y ejemplos.

Tabla 1.

Clasificación y ejemplos de contaminantes emergentes.

Clasificación	Tipo de producto	Ejemplo de contaminante emergente
Fármacos	Antiinflamatorio	Ibuprofeno, diclofenaco, ketoprofeno y naproxeno
	Analgésico	Ácido salicílico y paracetamol
	Antisépticos	Triclosan y bifenilol
	Antibióticos	Ciprofloxacina, trimetoprima, triclosán, tetraciclina y eritromicina
	Antiepilépticos	Carbamazepina
	Diuréticos	Furosemida e hidroclorotiazida
Hormonas y disruptores endocrinos		Estriol, progesterona, estrona y 17a-estradiol
Productos de cuidado personal		Oxibenzona y siloxanos
Medicina veterinaria	Antibióticos	Sulfacetamida, cloranfenicol y estreptomina
	Antiparasitarios	Deltametrina e ivermectina
Plaguicidas	Herbicidas	Atrazina y terbutilazina
	Fungicidas	Carbendazim e iprodiona
	Insecticidas	Clorpirifos y acetamiprid
Toxinas microbiológicas		Bolutina, ácido domoico, nodularinas y saxitoxinas
Endulzantes artificiales		Sucralosa, sacarina y aspartamo
Nanomateriales		Óxido de zinc y cobre, dióxido de titanio, fullerenos, carbón nanotubos y grafeno
Retardantes de fuego		Fosfato de tris, bisfenoles y fenoles bromados
Inhibidores de corrosión		Benzotiazoles y benzotriazoles
Filtros de UV		Benzofenona-3, octocrileno y homosalato

A continuación, se describe brevemente los tipos de contaminantes emergentes de mayor importancia y preocupación a nivel mundial.

Productos farmacológicos

Los productos farmacológicos producidos a partir de compuestos orgánicos sintéticos o naturales son utilizados para la prevención y el tratamiento de enfermedades o bien para mejorar la calidad de vida. Los fármacos se pueden clasificar de acuerdo a su acción en analgésicos, antiinflamatorios, antiepilépticos y antimicrobianos, entre otros.

Los fármacos de mayor consumo a nivel mundial son metformina, ibuprofeno, metamizol, ácido acetilsalicílico y paracetamol. Sin embargo, los productos farmacológicos no siempre se metabolizan por completo en el cuerpo humano, siendo algunos excretados inalteradamente o como metabolito o producto de degradación del compuesto original. En muchos casos, se han detectado fármacos en aguas residuales, antes y después de su tratamiento. De esta forma, son resistentes a la degradación biológica y persisten en el recurso hídrico, encontrándose en aguas subterráneas y superficiales.

Los antibióticos son un producto farmacológico de gran importancia para la Organización Mundial de la Salud (OMS), debido a que en muchos casos se ha detectado que ciertas bacterias generan resistencia a estos compuestos, permitiendo que estos microorganismos puedan sobrevivir y propagarse, aun cuando se administran antibióticos para su control.

Productos de cuidado personal

Los productos de cuidado personal son los más utilizados e incluyen productos de belleza, salud y limpieza. Algunos ejemplos son los protectores solares, fragancias, jabones, lociones, pastas de dientes y cosméticos. El amplio uso de estos productos en el aspecto médico y estético ha causado su liberación continua y prolongada al medio ambiente, causando un impacto negativo en el ecosistema y la salud humana. De hecho, los últimos años, se ha detectado su presencia en medios acuáticos (agua, sedimentos y biota). Además, los principales contaminantes de este tipo que han sido encontrados en aguas residuales y superficiales son antisépticos, fragancias y protectores solares.

La Figura 5 muestra la interacción de los productos farmacológicos y productos de cuidado personal con el medio ambiente.

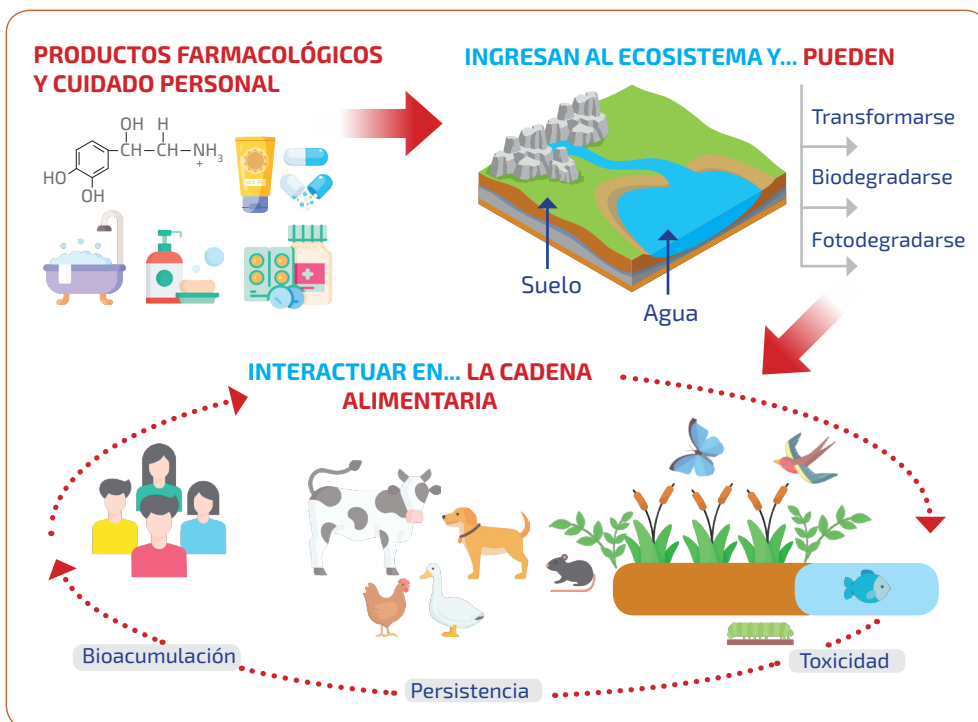


Figura 5.

Interacción de los productos farmacológicos y de cuidado personal con el medio ambiente. Fuente: Elaboración propia.

Medicamentos de uso veterinario

Los medicamentos de uso veterinario son ampliamente utilizados para mantener la salud animal y prevenir enfermedades infecciosas en animales y seres vivos. Estos productos pueden ingresar al recurso hídrico a través de vías directas e indirectas. Las vías directas incluyen la excreción de los animales y la aplicación directa en aguas superficiales (en el caso de la acuicultura); mientras que las vías indirectas son lixiviación, drenaje y escurrimiento del estiércol y orina en predios agrícolas. Este tipo de contaminante es de gran preocupación debido al aumento de demanda por productos alimenticios derivados del ganado que conlleva potencialmente al aumento de residuos veterinarios en aguas superficiales y subterráneas.

Plaguicidas

Los plaguicidas pueden ser compuestos químicos o naturales que previenen, controlan o repelen plagas y/o enfermedades en cultivos agrícolas. Los plaguicidas más utilizados son los herbicidas e insecticidas, los cuales alcanzan un 47,5% y 29,5% del consumo global de plaguicidas a nivel mundial (Calvo-Flores *et al.*, 2018). Los plaguicidas obtenidos a partir de síntesis química pueden tener estructuras químicas moleculares complejas, tales como organoclorados, organofosforados, carbamatos, ácidos carboxílicos y triazinas, entre otros; lo que en muchos casos dificulta su descomposición o degradación en matrices ambientales como el suelo y el agua.

La presencia de plaguicidas en el agua deriva principalmente de escorrentía en el campo agrícola y aguas residuales industriales. La solubilidad de los plaguicidas permite que ellos sean arrastrados a través de la lluvia y se filtren a través del suelo, alcanzando aguas subterráneas y afectando negativamente los ecosistemas y salud humana. En este sentido, se ha demostrado que los plaguicidas causan efectos adversos en la salud humana alterando el equilibrio hormonal, endocrino, reproductivo, nervioso y llevando incluso a efectos cancerígenos. Además, existe una preocupación a nivel mundial por su acumulación en organismos acuáticos y en el sedimento del suelo, lo cual representa un gran riesgo de toxicidad para el ecosistema y la salud humana.

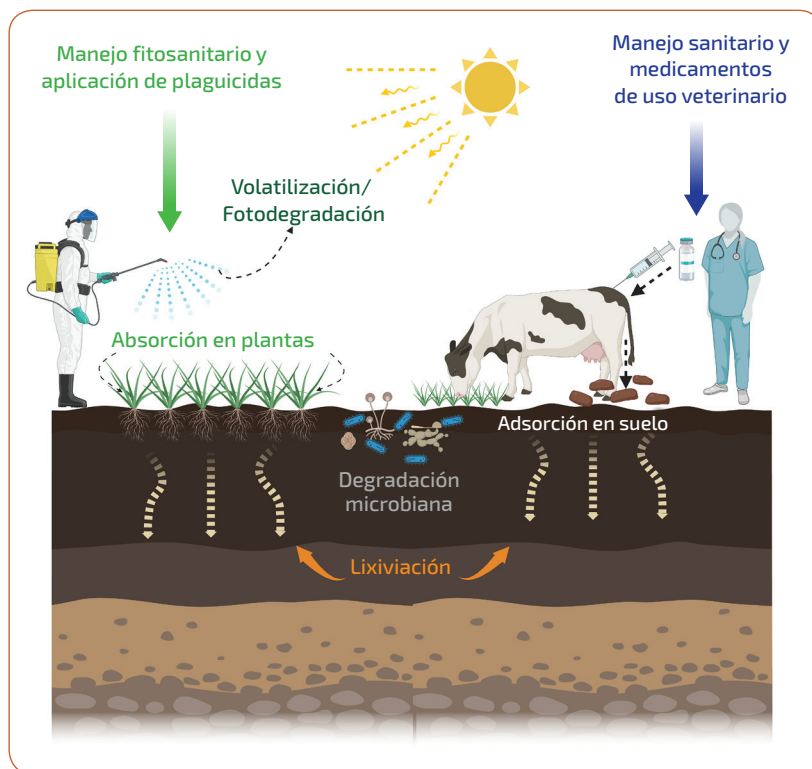


Figura 6.

Interacción de los medicamentos de uso veterinario y plaguicidas en el medio ambiente. Fuente: Elaboración propia.

IMPACTO DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES EN EL RECURSO HÍDRICO Y LOS ECOSISTEMAS

Los contaminantes emergentes son liberados constante y prolongadamente al agua, impactando directa o indirectamente a los seres vivos de los ecosistemas. Además, debido a que las plantas de tratamiento de aguas residuales son poco eficientes en la remoción de los contaminantes emergentes, se ha detectado su presencia en lugares y ambientes remotos, haciendo aún más preocupante sus efectos.

La información disponible sobre el comportamiento, acumulación y destino de los contaminantes emergentes en el agua y ecosistemas es un área de profundo interés científico, por lo tanto, muchos países han adoptado pro-

gramas de monitoreo y seguimiento. Estos programas de monitoreo y seguimiento, describen que muchos de los contaminantes emergentes más comunes han sido utilizados durante años, sin embargo, su impacto y su efecto, ha sido descubierto recientemente. En este sentido, los contaminantes emergentes presentes en el agua representan una amenaza para la flora y la fauna, afectando la cadena trófica de alimentos y la seguridad alimenticia. Esto debido a que los contaminantes emergentes pueden transportarse a través del medio acuoso, biodegradarse o transformarse en aguas superficiales, lo cual aumenta su biodisponibilidad en sedimentos o suelo. Por otra parte, los contaminantes emergentes en zonas rurales y urbanas pueden transportarse a través del aire, escorrentía o lixiviación (Petrie *et al.*, 2015). Además, en áreas agrícolas pueden interactuar con lodos o estiércoles que pueden modular su degradación y persistencia (Figura 6).

A continuación, se resumen en la Tabla 2, los principales impactos de los contaminantes emergentes de mayor importancia a nivel mundial.

Tabla 2.
Principales impactos de los contaminantes emergentes en el medio ambiente y ecosistemas.

Clasificación	Principales impactos
Fármacos	Anomalías en la biota marina
Hormonas y disruptores endocrinos	Toxicidad en biota marina
Productos de cuidado personal	Bioacumulación en especies marinas (peces, algas, otros)
Medicina veterinaria	Contaminación de aguas subterráneas y superficiales
Plaguicidas	Hermafroditismo en especies anfibias
	Resistencia de bacterias a antibióticos
	Toxicidad y riesgo para la salud humana
	Contaminación de aguas subterráneas y superficiales
	Disminución de poblaciones de abejas
	Toxicidad en especies anfibias
	Disminución de biodiversidad de especies vegetales, aves e insectos
Nanomateriales	Acumulación y toxicidad en algas, peces y plantas terrestres
Retardantes de fuego	Toxicidad sobre el comportamiento neurológico y disruptor endocrino en seres vivos
Filtros de UV	Bioacumulación en organismos marinos y animales terrestres
	Potencial toxicidad y riesgo para la salud humana

Considerando los efectos e impactos de los contaminantes emergentes en el medio ambiente, ecosistemas y recurso hídrico, es que se hace necesario conocer las alternativas para la remoción de contaminantes emergentes.

ALTERNATIVAS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES

La mayoría de los contaminantes emergentes interactúan con los ecosistemas debido a que las plantas de tratamiento de aguas residuales no logran remover en su totalidad la presencia de contaminantes como antibióticos, hormonas y disruptores endocrinos, productos de cuidado personal, plaguicidas, entre otros. Por lo tanto, surge la necesidad de adicionar procedimientos y tratamientos eficientes durante el tratamiento de agua, que permitan reducir la concentración de estos contaminantes emergentes.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales emplean métodos físicos, químicos y biológicos convencionales, los cuales consisten en un tratamiento primario, secundario y terciario. El tratamiento primario consiste en remover el material sólido y particulado de mayor tamaño. El tratamiento secundario consiste en degradar biológicamente la materia orgánica disuelta y los nutrientes como fósforo y nitrógeno para, finalmente, pasar por un tratamiento terciario, que tiene la finalidad de eliminar nitratos y otros compuestos. Sin embargo, el tratamiento de aguas residuales mediante estos métodos, no siempre es eficiente para remover o eliminar completamente la gran diversidad química de contaminantes emergentes, requiriendo implementar nuevos procedimientos y tecnologías. En este sentido, el principal desafío es implementar una procedimiento o tecnología que maximice la eficiencia en la remoción de contaminantes emergentes, que sea de bajo costo y que garantice que las aguas tratadas puedan ser reutilizadas cumpliendo con la normativa vigente y sin impacto en el medio ambiente. Esto, considerando que los contaminantes emergentes son difíciles de remover o degradar por su composición o características físico-químicas, haciendo necesario un tratamiento adicional para su remoción.

En los últimos años se han realizado estudios del proceso de adsorción para remover contaminantes emergentes, utilizando adsorbentes como carbono activado y arcillas naturales. Además de membranas de nanofiltración y osmosis inversa, las cuales pueden eliminar contaminantes emergentes de tipo orgánico. Sin embargo, los procesos de oxidación avanzadas son la tecnología más prometedora y eficiente en la remoción de estos contaminantes emergentes, dado que alcanzan una gran velocidad y conversión de contaminantes a productos finales inocuos e inofensivos para el medio ambiente. Ya que permite oxidar compuestos orgánicos en dióxido de carbono, agua y ácidos minerales. Sin embargo, a pesar de su gran eficiencia, sus altos costos de operación, mantención e implementación, impiden su utilización en muchas ciudades e industrias.

En la Tabla 3, se resumen las principales tecnologías de tratamiento para contaminantes emergentes y sus limitaciones.

Tabla 3.
Principales tecnologías de tratamiento para contaminantes emergentes y sus limitaciones

Tecnología de tratamiento	Tipo de contaminante emergente	Limitaciones
Adsorción Carbón activado Arcillas naturales	Plaguicidas Antibióticos Productos de cuidado personal Nanomateriales	Su eficiencia disminuye en presencia de materia orgánica debido a su capacidad de alta capacidad de adsorción, donde se saturan los microporos del adsorbente.
Membranas Nanofiltración Osmosis reversa Ultrafiltración	Plaguicidas Antibióticos Productos de cuidado personal Productos de medicina veterinaria	Se debe usar un tipo de membrana adecuada y específica para cada contaminante debido a sus propiedades físico-químicas. Poseen una limitada selectividad.
Tratamiento Biológico Lodos activados	Plaguicidas Antibióticos Productos de cuidado personal	Son eficientes solo en la remoción de contaminantes polares.
Oxidación avanzada Radiación UV Peróxido de hidrógeno TiO2 Fenton Ozono	Plaguicidas Antibióticos Productos de cuidado personal Productos de medicina veterinaria Nanomateriales Retardantes de fuego Filtros de UV	Altos costos de operación, mantención e implementación.

Las tecnologías mencionadas anteriormente, corresponden a métodos convencionales de tratamiento de contaminantes emergentes. Sin embargo, durante el último tiempo se han implementado nuevas tecnologías, de bajo costo y amigables con el medio ambiente, que son consideradas una propuesta interesante para esta tratar esta clase de contaminantes, como los plaguicidas, por ejemplo. Esta tecnología de bajo costo corresponde a los lechos biológicos o sistemas de biopurificación (SBP).

Los lechos biológicos o sistemas de biopurificación (SBP)

Los SBP son una tecnología de bajo costo que tiene como finalidad prevenir la contaminación puntual por plaguicidas generada por la inadecuada manipulación de estos productos, previa a su aplicación en condiciones de campo. El SBP se basa en procesos de adsorción y degradación de plaguicidas que ocurren en una matriz orgánica (biomezcla) compuesta por suelo, paja de trigo y turba en proporciones volumétricas (1:2:1 v v⁻¹) y que debido a la acción de microorganismos (hongos y bacterias) permiten la mineralización o degradación de los plaguicidas. Estos sistemas se han instalado en predios agrícolas, forestales, viveros u otros y son diseñados dependiendo de la aplicación o uso que se requiera (Diez *et al.*, 2013). Además, el sistema ha sido probado y alcanza niveles de remoción mayor al 90% posterior a 30 días con herbicidas como la atrazina, insecticidas como el clorpirifos y fungicidas como la iprodiona, que pueden ser degradados a moléculas más simples, disminuyendo su impacto en el medio ambiente.

Por otro lado, los microorganismos como hongos y bacterias, que se han aislado del SBP, han demostrado una gran capacidad de degradación de los plaguicidas atrazina, iprodiona y clorpirifos, en condiciones de mezcla de los tres plaguicidas, altas concentraciones (50 mg L⁻¹ cada uno) y en sistema continuo (flujo constante en bioreactores) (Levio-Raiman *et al.*, 2021a; Levio-Raiman *et al.*, 2021b). Por lo tanto, su utilización en una tecnología de tratamiento de aguas residuales que contiene plaguicidas provenientes del proceso de lavado de productos agrícolas, permitiría reducir la contaminación del recurso hídrico por plaguicidas y reducir el impacto ambiental del proceso productivo, que por consecuencia también reduciría el consumo de agua fresca para el lavado de los productos agrícolas, ya que utilizando el sistema de tratamiento se podría obtener un agua tratada con calidad de agua de riego o para distintos fines según la normativa vigente (NCh1333).

Por lo tanto, los SBP son una alternativa interesante para remover este tipo de contaminantes como los plaguicidas.

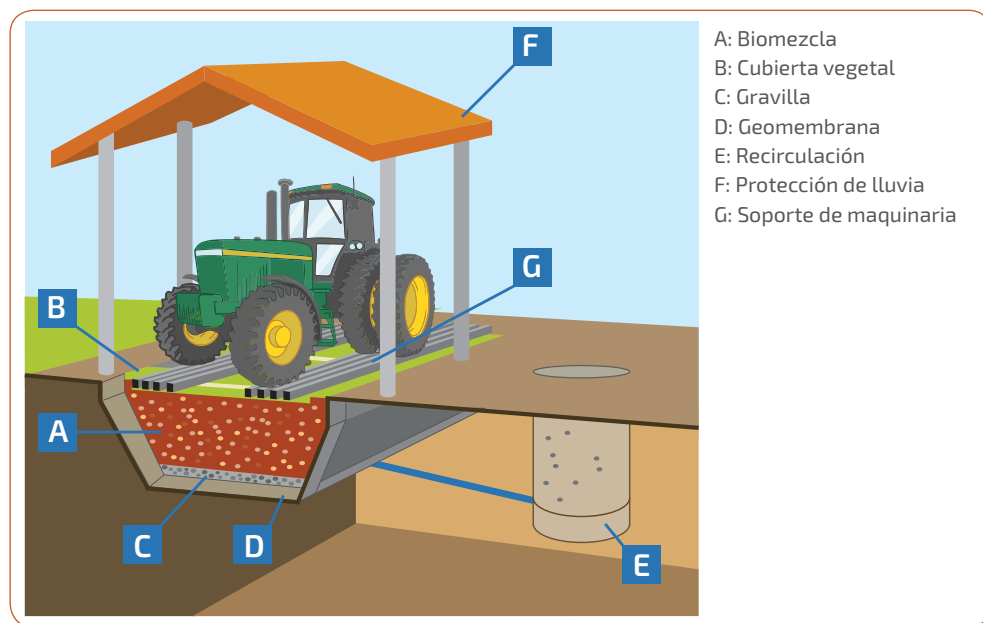


Figura 7.

Esquema de un lecho biológico para evitar la contaminación por plaguicidas.
Fuente: Díez et al., (2023).

CONCLUSIONES

De acuerdo a lo descrito anteriormente los contaminantes emergentes derivan de la mayoría de los productos que se utilizan en la vida cotidiana, por ejemplo, productos de cuidado personal, fármacos, endulzantes artificiales, filtros UV, entre otros. En este sentido, disminuir la liberación y la acumulación de este tipo de contaminantes es un gran desafío, destacando además que no existen legislaciones o normativas vigentes que regulen su aplicación en nuestro país. Asimismo, los contaminantes emergentes no se encuentran dentro de las normativas vigentes que se relacionan con la calidad de agua, por lo cual no son evaluados en los análisis cotidianos. Por ello, en primera instancia se recomienda:

- Implementar métodos simples y de fácil acceso para detectar y monitorear la concentración de contaminantes emergentes en los recursos hídricos y ecosistemas.
- Realizar evaluaciones sobre la persistencia y acumulación de contaminantes emergentes en ecosistemas para determinar su interacción con los organismos vivos a través de procesos biológicos, químicos y físicos.
- Elaborar nuevas normativas enfocadas en políticas públicas, que establezcan límites de concentración de contaminantes emergentes, para evitar con ello la exposición de los seres humanos y del ecosistema en general.
- Se requiere mayor información sobre los contaminantes emergentes en la población en general, debido principalmente a un desconocimiento de este tipo de contaminantes y de su potencial impacto ambiental. Tras ello se podrían implementar programas de divulgación que permitan crear mayor consciencia sobre el uso y aplicación de productos que contengan compuestos considerados como contaminantes emergentes.
- Adicionalmente, es de vital importancia crear consciencia en la población sobre el impacto en el medio ambiente de productos de cuidado personal, maquillaje, productos farmacéuticos, plaguicidas, u otros, los cuales encontramos rutinariamente. Para con ello, impulsar el uso de productos biodegradables y amigables con el medio ambiente con la finalidad de disminuir o reemplazar los productos químicos actualmente considerados como contaminantes emergentes.
- Implementar y desarrollar nuevas tecnologías, novedosas y de bajo costo para reducir la concentración de contaminantes emergentes en el agua de consumo humano para mitigar su persistencia en el ecosistema y sus efectos tóxicos en el ser humano.
- Finalmente, para la protección de los recursos hídricos, se recomienda promover el uso de nuevas tecnologías de tratamiento, como los sistemas de biopurificación (SBP) como una alternativa para reducir la presencia de plaguicidas en el medio ambiente.

REFERENCIAS

- Calvo-Flores, F. G., Isac-García, J., & Dobado, J. A. 2018. *Emerging pollutants: origin, structure, and properties*. John Wiley & Sons.
- Diez, M. C., Palma, G., Altamirano, C., Briceño, G., Calderón, C., Diaz, J., Rubilar, O., & Tortella, G. 2013. Manual de construcción y operación de lechos biológicos. Proyecto D09R1006. Manejo adecuado de residuos de Plaguicidas en la Producción Frutícola de la región de La Araucanía a través de la implementación y difusión de Lechos Biológicos. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.1400>
- Diez, M. C., Schalchli, H., & Levío-Raimán, M. 2023. Policy Brief CRHIAM N°15 Recomendaciones para evitar la contaminación por plaguicidas y proteger los recursos hídricos ANID/FONDAP/15130015.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. Water pollution from agriculture: a global review.
- Levio-Raiman, M., Briceño, G., Leiva, B., López, S., Schalchli, H., Lami-lla, C., Bornhardt, C., & Diez, M. C. 2021a. Treatment of pesticide-contaminated water using a selected fungal consortium: Study in a batch and packed-bed bioreactor. *Agronomy*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy11040743>
- Levio-Raiman, M., Schalchli, H., Briceño, G., Bornhardt, C., Tortella, G., Rubilar, O., & Cristina Diez, M. 2021b. Performance of an optimized fixed-bed column packed with an organic biomixture to remove atrazine from aqueous solution. *Environmental Technology and Innovation*, 21, 101263. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101263>
- Petrie, B., Barden, R., & Kasprzyk-Hordern, B. 2015. A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Research*, 72, 3–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.053>
- Roig, J. 2022. Eliminación de contaminantes emergentes mediante Humedales Artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencional. Universidad Politécnica de Valencia.

- Vasilachi, I., Asiminicesei, D., Fertu, D., & Gavrilesco, M. 2021. Occurrence and Fate of Emerging Pollutants in Water Environment and Options for Their Removal. *Water*, 13(2), 181. <https://doi.org/10.3390/w13020181>
- Vidal, G., Gómez, G., & Diez, M. C. 2021. Soluciones basadas en la naturaleza para la descontaminación de descargas puntuales y difusas. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM). ANID/FONDAP/15130015.
- Zandaryaa, S., & Frank-Kamenetsky, D. 2021. A source-to-sea approach to emerging pollutants in freshwater and oceans: pharmaceuticals in the Baltic Sea region. *Water International*, 46(2), 195–210. <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1889867>



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

CONTAMINANTES EMERGENTES: CONCEPTOS BÁSICOS, IMPACTO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Serie Comunicacional CRHIAM