

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-04-04

Artículos

**Efectos de levonorgestrel como contaminante de
preocupación emergente en el agua: una revisión**
**Effects of levonorgestrel as contaminant of emerging
concern in water: A review**

Andrea Paola Cervantes-Venegas¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9839-9477>

Miguel Ángel Ramos-López², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7105-5039>

Juan Campos-Guillén³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7117-6781>

Aldo Amaro-Reyes⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6520-5742>

Carlos Eduardo Zavala-Gómez⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9416-0608>

Janet Ledesma-García⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0677-4280>

José Alberto Rodríguez-Morales⁷, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4532-9665>

¹Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, acervantes08@alumnos.uaq.mx

²Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, agromyke@yahoo.com

³Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, juan.campos@uaq.mx

⁴Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, aldoamaro@gmail.com

⁵Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, eduardo.zavala@uaq.mx

⁶División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, janet.ledesma@uaq.mx

⁷Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, josealberto970@hotmail.com

Autor para correspondencia: José Alberto Rodríguez-Morales, josealberto970@hotmail.com

Resumen

La contaminación del agua constituye un riesgo significativo para la salud humana y para los ecosistemas acuáticos. Entre los contaminantes presentes en este recurso se encuentran los contaminantes de preocupación emergente (CPE), compuestos no regulados que, aun en bajas concentraciones, pueden generar efectos adversos en los organismos. Uno de ellos es el levonorgestrel (LNG), una progestina sintética ampliamente utilizada en medicina humana y veterinaria, cuya principal vía de ingreso al medio acuático es la descarga de aguas residuales, dado que cerca del 70 % del compuesto se excreta por orina y heces. El LNG ha sido detectado en cuerpos de agua de países como España, Canadá, México, Malasia y EUA, en concentraciones que varían

entre 0.11 y 88 ng/l. A estos niveles puede causar masculinización en peces, alteraciones en talla y peso, y interrupciones en los ciclos reproductivos. Los procesos convencionales de tratamiento de agua resultan poco eficientes para su eliminación, lo que hace necesario recurrir a técnicas de filtración avanzada o a procesos avanzados de oxidación. Este trabajo presenta una revisión bibliográfica sobre el LNG como contaminante emergente, abordando sus características, su presencia en el ambiente, los efectos reportados en organismos acuáticos, las principales técnicas de detección y los procesos de remoción más estudiados.

Palabras clave: contaminación del agua, agua residual, tratamiento del agua, producto farmacéutico, levonorgestrel, medio ambiente acuático, higiene ambiental, estudio bibliográfico.

Abstract

Water pollution poses a significant risk to human health and aquatic ecosystems. Among the contaminants present in this resource are emerging contaminants (ECs), unregulated compounds that, even at low concentrations, can produce adverse effects on organisms. One of them is levonorgestrel (LNG), a synthetic progestin widely used in human and veterinary medicine. Its main pathway into the aquatic environment is through wastewater discharges, since approximately 70 % of the compound is excreted via urine and feces. LNG has been detected in water bodies from countries such as Spain, Canada, Mexico, Malaysia, and the United States, in concentrations ranging from 0.11 to 88 ng/l. At these levels, it can cause fish masculinization, changes in size and weight, and disruptions in reproductive cycles. Conventional wastewater treatment

processes are not efficient in removing this type of contaminant, making it necessary to apply advanced filtration techniques or advanced oxidation processes. This work presents a literature review on LNG as an emerging contaminant, addressing its characteristics, environmental occurrence, reported effects on aquatic organisms, main detection techniques, and the most studied removal processes.

Keywords: water pollution, waste water, water treatment, pharmaceuticals, levonorgestrel, aquatic environment, environmental health, literature reviews.

Recibido: 30/06/2025

Aceptado: 07/10/2025

Publicado *ahead of print*: 05/11/2025

Versión final: 01/07/2026

Introducción

El agua es un recurso indispensable para la vida humana y acuática. Sin embargo, la industrialización y urbanización han incrementado su demanda y, con ello, la contaminación de este recurso (Panhwar *et al.*, 2024). El uso del agua en actividades industriales, domésticas, hospitalarias y recreativas genera contaminantes de diversa índole, entre ellos los contaminantes de preocupación emergente (CPE). Estos conforman un amplio grupo de sustancias que, al no estar reguladas ni monitoreadas, suscitan preocupación porque, incluso en concentraciones muy bajas, pueden provocar efectos adversos en el ambiente. Existen distintas clasificaciones de los CPE, pero la mayoría incluye productos de

cuidado personal, fármacos, microplásticos, desechos de la industria química, retardantes de fuego, agroquímicos y disruptores endocrinos (Đurišić-Mladenović *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024a).

Los disruptores endocrinos son compuestos que afectan el sistema endocrino en humanos y animales, principalmente porque alteran la producción, liberación y transporte de las hormonas, lo que puede desestabilizar el metabolismo (Piekutin *et al.*, 2025). Las hormonas se consideran disruptores endocrinos debido a que, incluso en concentraciones pequeñas, generan cambios en el sistema endocrino (Rosendaal *et al.*, 2003) y afectan el crecimiento, el desarrollo, la diferenciación sexual y la reproducción de los organismos (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2022; Varticovski *et al.*, 2022). Las hormonas se utilizan en humanos para tratamientos de alergias, asma, problemas de la piel y como métodos anticonceptivos. En veterinaria, se emplean para tratar problemas reproductivos, y para preparar animales donantes y receptores en la transferencia de embriones. Una clasificación de las hormonas las divide en naturales, como la estrona y el 17β -estradiol, y sintéticas, como el 17α -etinilestradiol y el levonorgestrel (LNG) (Almazrouei *et al.*, 2023).

El levonorgestrel (LNG) es una progestina sintética utilizada principalmente como método anticonceptivo. La presentación más común de LNG es la píldora anticonceptiva de emergencia, pero también se encuentra en formatos como el implante subdérmico, el dispositivo intrauterino y en combinación con otros compuestos en anticonceptivos de 28 días. Normalmente, el LNG se emplea para evitar el embarazo después de tener relaciones sexuales sin un método anticonceptivo físico o por la falla de este. Su mecanismo de acción consiste en la inhibición de la ovulación, además de generar cambios en el útero que dificultan la implantación del óvulo. Se estima que, en EUA, al menos el 20 % de las

mujeres lo ha utilizado alguna vez, mientras que en España, Portugal, Ghana y Turquía este porcentaje varía entre el 26 y 31 %. En México, el 11.5 % de las mujeres ha empleado un método anticonceptivo que incluye LNG (Endler *et al.*, 2022; INEGI, 2023; Calderón-Carabajo *et al.*, 2024).

Los contaminantes de preocupación emergente (CPE) ingresan al medio acuático por diferentes rutas, sobre todo a través de la descarga de aguas residuales industriales, domésticas y hospitalarias. El levonorgestrel (LNG) y varios productos de cuidado personal llegan al agua porque no son completamente metabolizados en el cuerpo, y alrededor del 70 % se excreta por orina y heces (Vázquez-Tapia *et al.*, 2022; Almazrouei *et al.*, 2023).

El proceso de tratamiento de agua residual consta de un tratamiento preliminar, uno primario y otro secundario. El objetivo de estos procesos es la remoción de metales pesados, materia orgánica y la desinfección (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2022; Shamshad & Rehman, 2025). La infraestructura actual de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) no es suficientemente eficiente para la remoción de los contaminantes de preocupación emergente (CPE). Además, los CPE poseen características que los hacen persistentes en el agua: la mayoría presenta un bajo coeficiente de partición octanol-agua y alta hidrofobicidad (Dias *et al.*, 2023), lo que dificulta su degradación en las PTAR. Por ello, incluso en el efluente de estas plantas se detectan dichos contaminantes (Meena *et al.*, 2025).

Algunas de las técnicas de detección utilizadas son la cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) y la cromatografía líquida de ultra alto rendimiento (UPLC), con detectores de diodos y fluorescencia. También se emplean biosensores, que usan moléculas capaces de

responder a contaminantes específicos (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2022; Calus-Makowska *et al.*, 2023).

El levonorgestrel (LNG) ha sido detectado en diferentes cuerpos de agua en países como Canadá, Portugal, Malasia y México, en concentraciones que varían entre 0.11 y 88.3 ng/l (Goeury *et al.*, 2022; Garduño-Jiménez *et al.*, 2023; Morais *et al.*, 2023; Arumugam *et al.*, 2025; Munzhelele *et al.*, 2025). Con estas concentraciones, el LNG puede generar diversos efectos en especies acuáticas. En peces como *Pimephales promelas* (carpa cabezona), *Danio rerio* (pez cebra) y *Menidia beryllina* provoca aumento de peso y talla, disminución en la producción de huevos, reducción en los niveles de estradiol y testosterona, y alteraciones en el metabolismo proteico y en la síntesis de otras moléculas (Runnalls *et al.*, 2015; Madesh *et al.*, 2024; Mukherjee & Maitra, 2024). En moluscos como *Ruditapes decussatus*, el LNG afecta los niveles de enzimas antioxidantes (Li *et al.*, 2024b).

Ya se mencionó que los procesos convencionales de tratamiento de agua no son eficientes para la remoción de contaminantes de preocupación emergente (CPE), por lo que aún pueden encontrarse en efluentes de plantas de tratamiento y en otros cuerpos de agua. Para hacer más eficiente su eliminación es necesario emplear tratamientos complementarios, como adsorción, floculación, filtraciones avanzadas, tratamientos biológicos o procesos de oxidación avanzada, entre ellos la ozonización (Angel-Ospina & Machuca-Martínez, 2022), el ultrasonido en combinación con KMnO_4 , la fotocatálisis y los procesos Fenton (Broséus *et al.*, 2009; Xiao-Yan *et al.*, 2015; Rodríguez-Hernández *et al.*, 2022; Farooq *et al.*, 2023; Bayode *et al.*, 2024; Gebru & Werkneh, 2024; Hübner *et al.*, 2024).

El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo una revisión bibliográfica sobre el levonorgestrel (LNG), identificando sus características, fuentes de contaminación e ingreso al medio acuático; las concentraciones en las que se ha detectado; las técnicas de detección y los posibles procesos de remoción, además de revisar sus efectos en los organismos acuáticos.

Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica sobre el levonorgestrel (LNG), abarcando sus características, presencia en el ambiente, efectos en los organismos acuáticos, técnicas de detección y procesos de remoción.

Objetivos específicos

- Identificar las características fisicoquímicas del levonorgestrel (LNG).
- Identificar las principales fuentes de contaminación que favorecen el ingreso del levonorgestrel al medio acuático.
- Compilar las concentraciones de levonorgestrel reportadas a nivel nacional e internacional.
- Examinar los efectos del levonorgestrel en diferentes especies acuáticas.
- Revisar las metodologías analíticas empleadas para la detección y cuantificación del levonorgestrel en agua.

Materiales y métodos

Se hizo una búsqueda sistemática de literatura científica con el objetivo de recopilar información sobre el levonorgestrel (LNG) como contaminante de preocupación emergente. La búsqueda se llevó a cabo en las bases de datos Elsevier, Springer, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI) y *Google Scholar*.

Se consideraron artículos publicados entre 2012 y 2025 en inglés y en español. Como criterios de inclusión se seleccionaron:

- Artículos de revisión y artículos científicos.
- Publicaciones de acceso abierto.
- Estudios relacionados con las características fisicoquímicas del LNG, su presencia ambiental, los efectos en organismos acuáticos, las técnicas de detección y los procesos de remoción.

Como criterios de exclusión se descartaron:

- Documentos duplicados.
- Publicaciones sin acceso abierto.
- Artículos que no presentaban relación directa con el tema de estudio.

La búsqueda se efectuó de enero a junio de 2025, y se obtuvieron 139 documentos revisados, de los cuales 77 cumplieron con los criterios de selección y se analizaron en este trabajo.

Contaminación del agua

La contaminación del agua es uno de los problemas ambientales más serios a nivel global, pues este recurso es esencial para la vida y el

desarrollo de los seres vivos. Factores como el cambio climático, el crecimiento industrial y la rápida urbanización han reducido la cantidad de agua disponible en condiciones adecuadas para el consumo humano y para la estabilidad de los ecosistemas acuáticos.

El aumento de las actividades agrícolas, domésticas, industriales y hospitalarias ha provocado la liberación de una gran variedad de contaminantes en ríos, lagos y aguas subterráneas. Entre ellos se encuentran los contaminantes de preocupación emergente (CPE), un grupo de sustancias que, aunque no están sujetos a regulaciones ni a supervisión sistemática, se han detectado en concentraciones bajas capaces de generar efectos adversos en los organismos acuáticos y en la salud humana.

En este contexto, resulta crucial profundizar en el estudio de los CPE, sus fuentes de emisión, su persistencia en el medio ambiente y las alternativas tecnológicas que permitan mejorar su eliminación en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Kumar *et al.*, 2024; Nelson *et al.*, 2025).

La agricultura es la actividad con mayor consumo de agua a nivel global, y genera contaminantes como plaguicidas y fertilizantes. La industria también consume grandes cantidades de agua y, en sus efluentes, pueden encontrarse contaminantes como solventes tóxicos, así como sustancias orgánicas e inorgánicas. La actividad doméstica representa otra fuente importante de contaminación debido a los químicos empleados en labores de limpieza y en productos de cuidado personal (Lin *et al.*, 2022; Mendoza-Retana *et al.*, 2022; Babuji *et al.*, 2023).

En la Figura 1 se muestra la forma en que los contaminantes de preocupación emergente (CPE) llegan a los cuerpos de agua: los

contaminantes generados por la actividad agrícola terminan en el medio acuático a través de las escorrentías, mientras que los procedentes de actividades domésticas e industriales ingresan mediante las descargas de aguas residuales (Kumar *et al.*, 2024; Das & Raj, 2025).

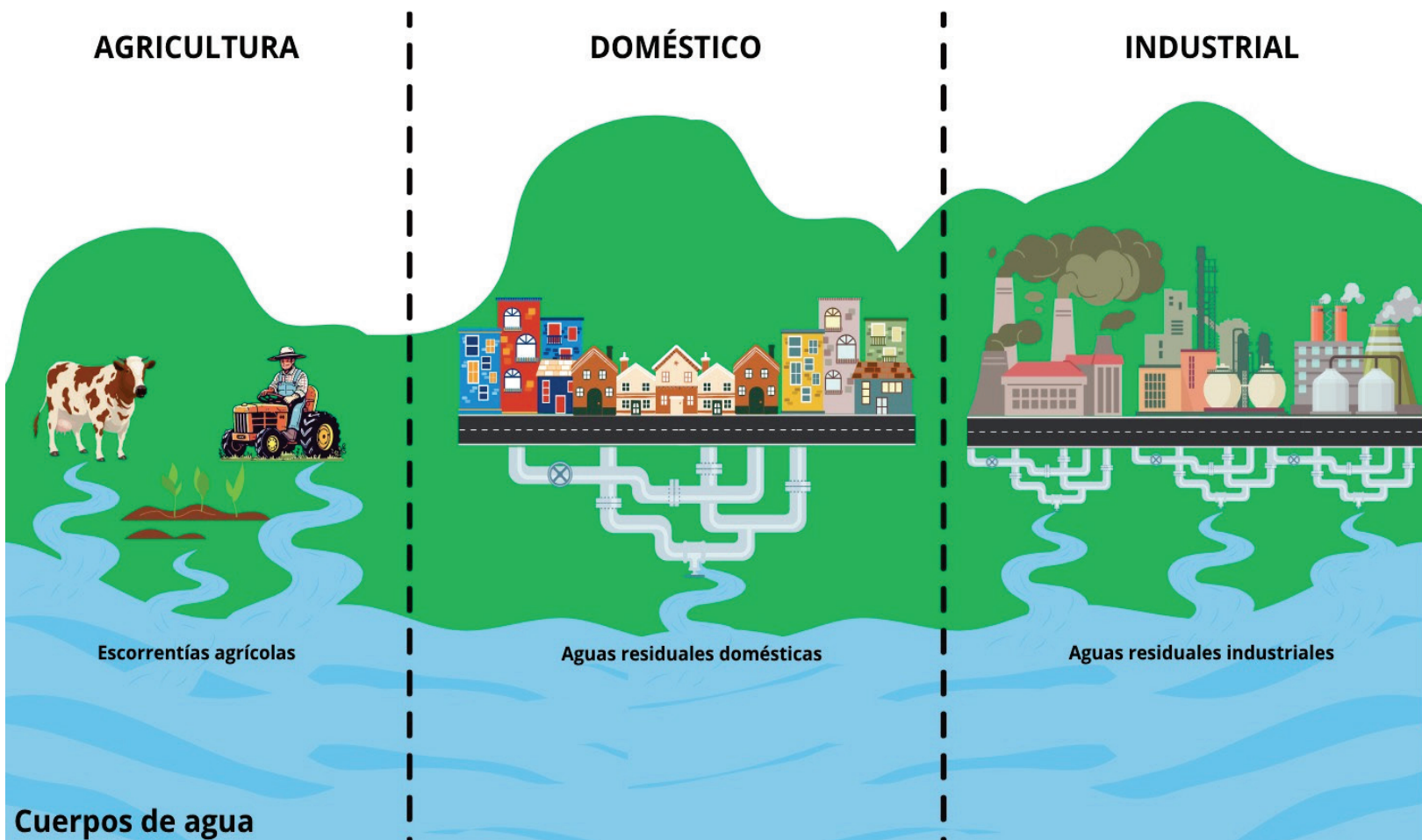


Figura 1. Medios de entrada de contaminantes de las principales actividades consumidoras de agua. Modificado de Kumar *et al.* (2024).

Por otra parte, se han reportado contaminantes presentes en bajas concentraciones en el agua, conocidos como contaminantes emergentes o contaminantes de preocupación emergente (CPE) (Meena *et al.*, 2025).

Contaminantes de preocupación emergente

Los contaminantes de preocupación emergente (CPE) son sustancias naturales o sintéticas cuya presencia en el ambiente no es monitoreada; sin embargo, incluso en bajas concentraciones pueden generar efectos negativos en los animales y en la salud humana (Fdez-Sanromán *et al.*, 2025). Entre los principales tipos de CPE están fármacos, plaguicidas, colorantes, cosméticos, microplásticos, químicos industriales y disruptores endocrinos (Nelson *et al.*, 2025).

En la Tabla 1 se presenta una breve descripción de los grupos de CPE, los tipos de productos en los que se emplean y algunos ejemplos representativos.

Tabla 1. Grupos de contaminantes de preocupación emergente, tipos de contaminantes y ejemplos.

Grupo	Descripción	Tipos	Ejemplos	Referencia
Fármacos	Productos farmacéuticos, de venta libre o con receta, empleados en el tratamiento y prevención de enfermedades	Antibióticos	Trimetoprim Claritromicina Amoxicilina Sulfametoxazol Sulfanilamida Sulfadimetoxina Ofloxacino	Osuoha <i>et al</i> (2025) Letsoalo <i>et al.</i> (2023) Das y Raj (2025)
		Antirretrovirales	Atazanavir Nevirapina Ritonavir Efavirenz Lopinavir Lamivudina Aciclovir	
		Quimioterapéuticos	Mitomicina Fluorouracilo	
		Analgésicos	Naproxeno Ibuprofeno Diclofenaco	
		Antidepresivos	Amitriptilina Venlafaxina Oxazepam Clorpromazina Fluoxetina	

Grupo	Descripción	Tipos	Ejemplos	Referencia
Productos de cuidado personal	Sustancias utilizadas en el cuerpo humano para higiene y belleza	Cosméticos	2-etilhexil-4-metoxycinamato	Puebla-Barragán y Reid (2021) Lozano <i>et al.</i> (2022) Wang <i>et al.</i> (2024)
		Productos de limpieza	Cloro Formaldehído Pentaclorofenol	
Químicos industriales	Sustancias utilizadas o generadas en procesos industriales	Metales pesados	Mercurio Plomo	Wang <i>et al.</i> (2024) Li <i>et al.</i> (2024a)
		Compuestos orgánicos volátiles	Benceno Tolueno Xileno	
		Retardantes de fuego	Tetrabromobisfenol A Dechlorane Plus	
		Hidrocarburos halogenados	Hexaclorobutadieno Diclorometano Cloroformo	
Disruptores endocrinos	Sustancias naturales o sintéticas que alteran el sistema endocrino de humanos y animales	Hormonas	Estrona Testosterona Progesterona 17 β -estradiol 17 α -etinilestradiol Levonorgestrel Noretidrona	Akanbi <i>et al.</i> (2025) Profita <i>et al.</i> (2024) Minh <i>et al.</i> (2016) Durcik <i>et al.</i> (2023)
		Compuestos fenólicos	Bisfenol A Nonilfenol 4-octilfenol	

Grupo	Descripción	Tipos	Ejemplos	Referencia
Plaguicidas	Sustancias utilizadas para prevenir, repeler, mitigar o eliminar plagas	Herbicidas	Metribuzin Asulam Triflurosulfuron-metilo	Mínguez-Alarcón <i>et al.</i> (2023) Liszewska <i>et al.</i> (2024) Liu <i>et al.</i> (2025)
		Fungicidas	Mepanipirim Dimetomorfo Metiram Clofentezina Bentiavalicarb Mancozeb Epoconazol	
		Insecticidas	Fipronil Ciflometofen Lambda-cihalotrina	
		Bactericidas	Epoconazol Fluzilazol	

El uso constante de los contaminantes de preocupación emergente (CPE) ha provocado que su presencia en el ambiente sea cada vez más común, especialmente la de los disruptores endocrinos, sustancias con la capacidad de generar alteraciones en el sistema endocrino de animales y humanos, que afectan diversas funciones del metabolismo y del desarrollo sexual (Masar *et al.*, 2024).

Disruptores endocrinos

Los disruptores endocrinos (EDCs, por sus siglas en inglés) son compuestos naturales o sintéticos capaces de alterar las funciones del sistema endocrino. Los principales efectos adversos asociados con su

exposición incluyen alteraciones en el metabolismo, el transporte, la síntesis y el bloqueo de hormonas (Profita *et al.*, 2024; Akanbi *et al.*, 2025). Dichos compuestos ejercen su acción principalmente a través de tres mecanismos:

1. Actuando como agonistas o antagonistas hormonales
2. Interfiriendo en las vías de señalización endocrina
3. Modificando la expresión génica y la producción de proteínas (Bulawska *et al.*, 2025)

Estos compuestos pueden generar efectos crónicos e irreversibles, como resistencia a la insulina, obesidad y diabetes; además, se han asociado con enfermedades neurológicas, cáncer de mama y anomalías reproductivas (Imparato *et al.*, 2022).

Varios de los contaminantes de preocupación emergente son considerados disruptores endocrinos, incluyendo fármacos, productos de cuidado personal, pesticidas, hormonas y algunos compuestos químicos industriales (Robitaille *et al.*, 2022; Profita *et al.*, 2024). Los EDCs ingresan a los ecosistemas acuáticos por medio de las aguas residuales urbanas e industriales, así como por la inadecuada disposición de medicamentos y productos de cuidado personal (Imparato *et al.*, 2022). Los humanos y animales están en constante exposición a los EDCs a través de agua contaminada, productos comerciales y alimentos (Robitaille *et al.*, 2022; Stiefel & Stintzing, 2023; Profita *et al.*, 2024).

Las hormonas son los EDCs más comunes, utilizadas en terapias hormonales para el crecimiento, el desarrollo, la diferenciación sexual, y la reproducción en animales y humanos (Almazrouei *et al.*, 2023). La presencia de hormonas en el agua genera especial preocupación debido

a los potenciales efectos negativos que pueden producir en los organismos acuáticos (Durcik *et al.*, 2023; Grobin *et al.*, 2024).

Hormonas

Las hormonas son sustancias químicas producidas por glándulas endocrinas que regulan funciones fisiológicas (González-Flores *et al.*, 2024). Debido a su amplio uso, son consideradas los EDCs más importantes (Dias *et al.*, 2023). Las hormonas actúan como mensajeros químicos que, al llegar a los receptores hormonales, producen la activación o inhibición de acciones específicas en las células, generando respuestas biológicas características para cada hormona (Gal *et al.*, 2007).

Las hormonas esteroideas son las más consumidas y se clasifican en naturales, como la estrona y el 17β -estradiol, y sintéticas, como el levonorgestrel y el 17α -etinilestradiol (Dias *et al.*, 2023). Las principales hormonas esteroideas utilizadas son estrógenos, andrógenos y progestinas (Almazrouei *et al.*, 2023).

Los estrógenos cumplen una función esencial en el desarrollo y mantenimiento de los caracteres sexuales femeninos, mientras que la progesterona resulta indispensable para el desarrollo embrionario, la gestación y la regulación del ciclo menstrual. En contraste, los andrógenos participan en el crecimiento y desarrollo de los caracteres sexuales masculinos (Almazrouei *et al.*, 2023). Las progestinas, un grupo de hormonas esteroideas, pueden clasificarse en naturales, como la progesterona, y sintéticas, como el levonorgestrel, siendo ampliamente utilizadas como anticonceptivos, en terapias contra el cáncer y en la producción ganadera (Dias *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024a). Entre ellas, el

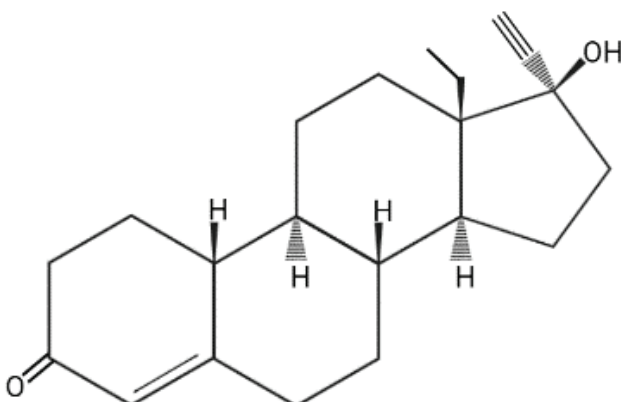
levonorgestrel se encuentra entre las progestinas más empleadas como anticonceptivo (Meece *et al.*, 2018).

La liberación de hormonas al medio acuático se asocia principalmente con su consumo por humanos y animales, dado que son excretadas y descargadas de manera continua hacia cuerpos de agua a través de las aguas residuales domésticas y pecuarias (Loffler *et al.*, 2024; Profita *et al.*, 2024).

Levonorgestrel

La progestina sintética levonorgestrel (LNG) es utilizada principalmente como método anticonceptivo hormonal; su efecto consiste en inhibir la ovulación y el desarrollo folicular (Runnalls *et al.*, 2015). A nivel global, el LNG es la hormona anticonceptiva más utilizada (Calderón-Carbajo *et al.*, 2024). En la Tabla 2 se presentan las características del levonorgestrel y su estructura química.

Tabla 2. Características fisicoquímicas de LNG y su estructura química.

Estructura química	Características fisicoquímicas	
	Fórmula química	C ₂₁ H ₂₈ O ₂
	Peso molecular	312.45
	Punto de fusión	240 °C
	pKa	13.09
	Log Kow	3.48
	Color	Blanco
	Densidad	1.0697 g/cm ³
	Estado físico	Sólido

Fuente: Wishart *et al.* (2022), Vrettakos y Bajaj (2023), Knox *et al.* (2024).

Las presentaciones más comunes del levonorgestrel en métodos anticonceptivos incluyen la píldora anticonceptiva de emergencia, los anticonceptivos orales combinados, el dispositivo intrauterino y el implante subdérmico.

En la Tabla 3 se presentan los principales mecanismos de acción del levonorgestrel.

Tabla 3. Principales mecanismos de acción de LNG.

Mecanismo de acción		Referencia
Inhibición de la ovulación	Suprime la función normal de la hormona luteinizante, lo que inhibe la ruptura del folículo y la liberación del óvulo	Knox <i>et al.</i> (2024)
Engrosamiento del moco cervical	Se engrosa el moco cervical, afectando el movimiento de los espermatozoides hacia el útero	Dinehart <i>et al.</i> (2020)

Debido a su amplio uso y a la incompleta remoción en los tratamientos de aguas residuales, el LNG se ha encontrado en cuerpos de agua superficiales, aguas subterráneas y en efluentes de plantas de tratamiento. En Canadá, en el río St. Lawrence, en Ontario, se reportó una concentración de LNG de 4.1 ng/l (Goeury *et al.*, 2022); en Malasia, la concentración encontrada en el río Langat fue de 22 ng/l (Arumugam *et al.*, 2025). En Sudáfrica, Munzhelele *et al.* (2025) determinaron la presencia de LNG en aguas residuales con concentraciones de 6.2-8.09 µg/l en el influente y de 4.25-20.9 µg/l en el efluente. Garduño-Jiménez *et al.* (2023) evaluaron diferentes contaminantes en cuerpos de agua en Hidalgo, México, encontrando concentraciones de LNG de 61.2 ng/l en el río Tula, 59.4 ng/l en el canal Tlamaco y 88.3 ng/l en el efluente de la planta de tratamiento de Atotonilco.

En la Figura 2 se ejemplifica cómo el LNG llega a los cuerpos de agua a partir de la ingesta de la hormona por los humanos. Después de su administración, el levonorgestrel presenta una vida media en el cuerpo humano de 20-60 h y no es completamente metabolizado, por lo que aproximadamente el 45 % del compuesto se excreta por orina y el 32 % por heces (Knox *et al.*, 2024). Los tratamientos convencionales de aguas

residuales no son eficientes para la remoción de este tipo de contaminantes, por lo que se han encontrado concentraciones de LNG en cuerpos de agua, exponiendo a especies no objetivo y generando efectos adversos (Kaur *et al.*, 2021).

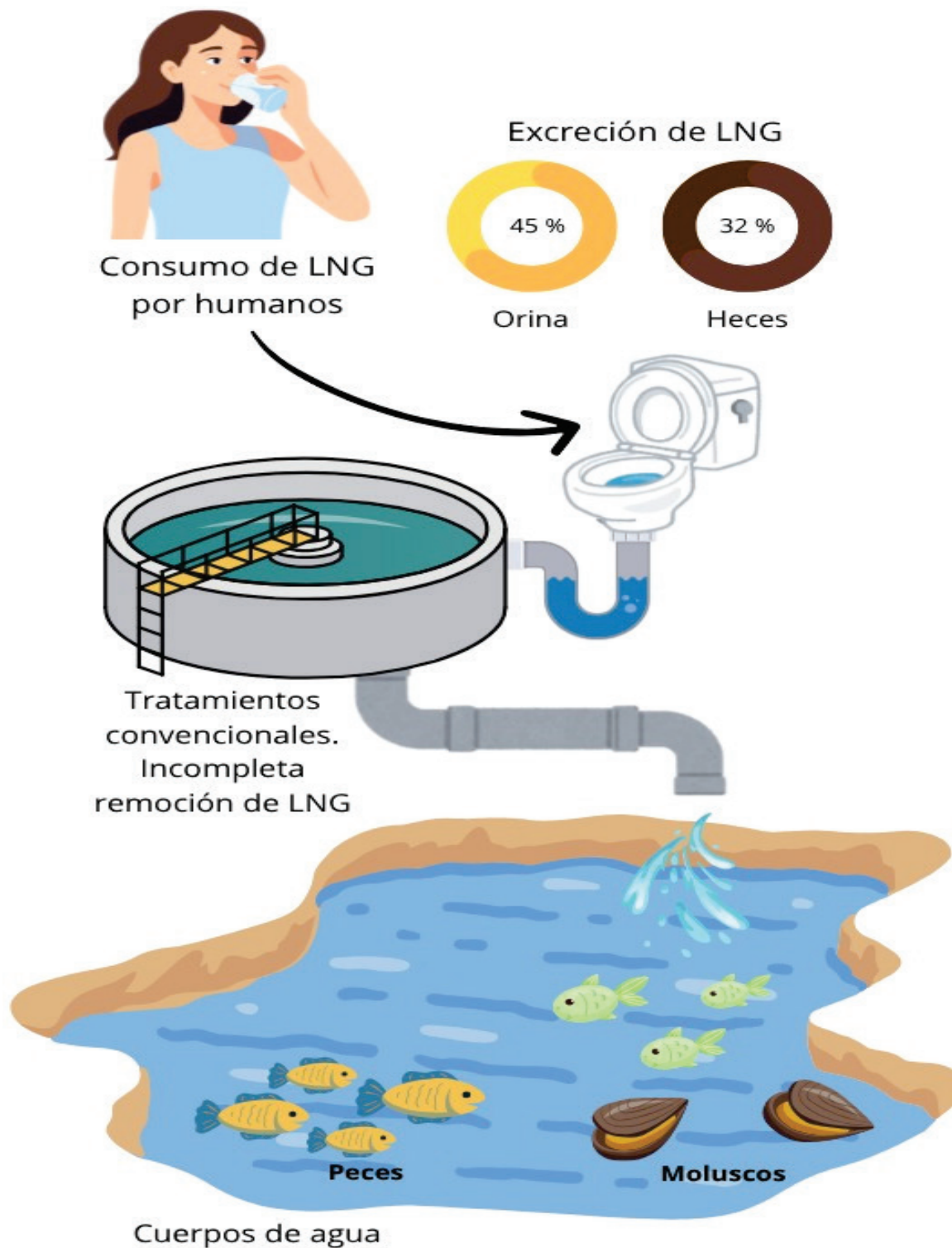


Figura 2. Vía de entrada del levonorgestrel a los cuerpos de agua tras el consumo humano y su disposición final en ecosistemas acuáticos.

No existe una legislación en la que se incluya al levonorgestrel; la concentración máxima permitida en el ambiente no está regulada en los ámbitos nacional e internacional. Sin embargo, debido a los efectos que genera en especies acuáticas no objetivo, el levonorgestrel debería estar considerado en alguna regulación por su potencial peligro para el ecosistema (Cifuentes *et al.*, 2016).

Efectos de levonorgestrel

Teniendo en cuenta que en el efluente de la planta de tratamiento de Atotonilco el Grande, Hidalgo, México, que desemboca en el río Tula, se encontraron 88.3 ng/l de LNG, es importante conocer los efectos que puede generar este compuesto incluso en concentraciones menores. Aunque la corriente del río puede diluir el contaminante, la descarga constante de aguas residuales provoca una exposición continua de los organismos acuáticos a sustancias como el levonorgestrel (Thrupp *et al.*, 2018). A continuación se exponen diversos efectos negativos generados por el LNG en organismos acuáticos.

Teigeler *et al.* (2021) evaluaron el efecto del LNG en *Danio rerio* (pez cebra) en diferentes etapas del ciclo de vida. En etapas tempranas observaron que el LNG disminuía la supervivencia de las larvas entre 21 y 35 dpf (días después de la fertilización) en organismos expuestos a concentraciones mayores a 0.47-1.67 ng/l, obteniendo una supervivencia de 65.5-49 %, respectivamente. En etapas juveniles (35-63 dpf) no se observó efecto. Al ser una hormona anticonceptiva, sus efectos más significativos se presentaron en la reproducción: a partir de los 64 dpf se generó un retraso en el desove desde concentraciones de 1.64 ng/l,

inhibiéndose totalmente con concentraciones superiores a 5.45 ng/l. Asimismo, se observó una disminución en la fertilización en organismos expuestos a 0.47 ng/l. En la etapa adulta (126 dpf), en machos se registró una disminución en la longitud y peso con 0.47 ng/l, mientras que en hembras no se observaron efectos significativos en estos parámetros. Sin embargo, no se identificaron hembras fenotípicas a 0.47 ng/l, lo que sugiere una masculinización, entendida como la presencia de características sexuales masculinas en hembras.

Por su parte, Svensson *et al.* (2016), trabajando también con *D. rerio*, observaron masculinización en la población a los 50 dpf en todas las concentraciones utilizadas (5.5, 79 y 834 ng/l). Además, evaluaron el efecto del LNG en el desarrollo y la expresión génica. A los 23 dpf registraron un aumento en la hormona antimülleriana (AMH) y en el citocromo CYP11B, ambos relacionados con el desarrollo sexual masculino. La AMH inhibe los conductos de Müller, esenciales para la formación del útero y las trompas de Falopio; mientras que el CYP11B favorece la diferenciación testicular. Por lo tanto, el incremento de AMH y CYP11B promueve el desarrollo masculino en los organismos.

Yang *et al.* (2025) evaluaron el efecto del LNG en *Gambusia affinis* (pez mosquito). A nivel morfológico, después de 30 días de exposición, los organismos presentaron una disminución en el peso, además de una curvatura en los huesos espinosos 14, 15 y 16, característica de los machos, con concentraciones de 500 ng/l. En hembras, el LNG afectó el desarrollo de los ovocitos. Con una concentración de 50 ng/l se presentó un aumento de ovocitos previtelogénicos (PVO), y una disminución de ovocitos vitelogénicos tempranos (EVO) y tardíos (LVO), indicando falta de maduración. A 500 ng/l no se observó ningún LVO, lo que confirma la inhibición de la maduración ovocitaria.

En *Pimephales promelas* (carpa cabezona), Runnalls *et al.* (2015) reportaron una disminución en la producción de huevos con el incremento de la concentración: una reducción del 20 % a 0.5 ng/l; 40 % a 5 ng/l, y 85 % a 100 ng/l. En hembras, el LNG generó un aumento en peso, longitud y diámetro abdominal con 25 ng/l, efectos no observados en machos. Además, se determinó la concentración plasmática en peces expuestos a 5.2 y 15.8 ng/l, registrándose niveles de 0.36 y 1.51 ng/l, respectivamente, lo cual se asocia con inhibición de la ovulación.

En moluscos, *Ruditapes decussatus*, Mannai *et al.* (2022) reportaron que el LNG induce estrés oxidativo, afectando los niveles de superóxido dismutasa (SOD) y catalasa (CAT) a 1 000 ng/l. Por otra parte, Contardo-Jara *et al.* (2011) observaron que *Dreissena polymorpha* acumulaba LNG, evaluando el factor de bioacumulación (BCF). Con una concentración de 0.312 mg/l se obtuvo un BCF de 208; con 3.12 mg/l, un BCF de 53; y con 6.24 mg/l, un BCF de 25. Esto indica una mayor bioacumulación a concentraciones bajas, mientras que a concentraciones altas disminuye, posiblemente por procesos regulatorios, de metabolismo y excreción. Además, la exposición a LNG produjo estrés oxidativo: desde el primer día se observó un aumento en SOD, mientras que la CAT se incrementó a partir del séptimo día de exposición.

Métodos de detección y remoción de LNG en medio acuático

Conociendo los efectos que genera el levonorgestrel en el medio acuático, es importante su detección y remoción oportuna. Para la determinación de compuestos como el levonorgestrel es necesario utilizar técnicas sensibles. Por ejemplo, Morais *et al.* (2023) detectaron progestinas en

tres estuarios en Portugal (Ría de Aveiro, estuario del Tajo y Ría Formosa). Para ello utilizaron cromatografía de líquidos de alta resolución acoplada a un espectrómetro de masas (HPLC-MS). Las progestinas que detectaron fueron drospirenona, desogestrel, gestodeno y levonorgestrel. En el tratamiento de las muestras emplearon un filtro de microfibra de vidrio Whatman. Para la fase sólida utilizaron cartuchos Oasis HLB (6 cc, 200 mg), y como fase móvil una mezcla de agua Milli-Q y ácido fórmico al 0.1 %. El volumen de inyección fue de 10 μ l, con un flujo constante de 0.35 ml/min. Para la espectrometría de masas se empleó ionización positiva, con un rango de 30-500 m/z y nitrógeno como gas de arrastre. Con estas condiciones obtuvieron un límite de detección (LOD) de 1.55 μ g/l y un límite de cuantificación (LOQ) de 4.7 μ g/l para el LNG. Las concentraciones encontradas en los estuarios fueron superiores a 10 ng/l.

Tanui *et al.* (2025) detectaron hormonas esteroideas en aguas superficiales y en efluentes de plantas de tratamiento de agua en Kenia. Aunque su objetivo no era la detección de LNG, identificaron hormonas estructuralmente similares, como norgestrel, 17 α -etinilestradiol y 17 β -estradiol, mediante HPLC-MS. Reportaron concentraciones promedio de progestágenos de 2.4 ng/l en los ríos Rang'wena, Sare, Rangwe, Asao y Lambwe. En las plantas de tratamiento de Kisat, Homabay, Kisii, Kericho y Nyalenda obtuvieron concentraciones medias de 0.61-270 ng/l en los efluentes, sustancialmente más bajas que en los influentes. Para norgestrel reportaron una concentración media de 80 ng/l.

Lucci *et al.* (2025) emplearon HPLC-MS/MS para la determinación de contaminantes emergentes, incluido el LNG, en arenas de playas de Tenerife. Para la extracción utilizaron el método QuEChERS: tamizaron la arena con mallas de 200 y 500 μ m; realizaron la extracción con una solución ácida en mezcla con acetonitrilo, y posteriormente añadieron

sales de MgSO_4 , NaCl y Na_2EDTA para mejorar la eficiencia de extracción y la purificación. Las condiciones cromatográficas incluyeron como fase móvil una mezcla de acetonitrilo y agua Milli-Q, con un flujo de 0.4 ml/min, utilizando una columna HPH-C18 como fase sólida e inyectando un volumen de 5 μl . El límite de cuantificación obtenido fue de 0.026 ng/g.

Una vez detectados estos compuestos en cuerpos de agua o efluentes de plantas de tratamiento, es relevante su remoción. Actualmente, los tratamientos convencionales de aguas residuales no son eficientes para eliminar contaminantes emergentes como el levonorgestrel. Milquez y Montagut (2023) señalan que las plantas de tratamiento de agua residual no están diseñadas para manejar compuestos farmacéuticos, pues se enfocan en la remoción de carbono biodegradable, nitrógeno, fósforo y microorganismos. Esto genera la necesidad de aplicar tratamientos más avanzados para la eliminación del LNG.

La adsorción es un método económico y rápido para la remoción de contaminantes emergentes (Almazrouei *et al.*, 2023). Jiménez-Skrzypek *et al.* (2023) evaluaron microplásticos de polietileno, poliestireno y polipropileno como adsorbentes de LNG en agua ultrapura y agua de mar. Determinaron la adsorción a partir de la cantidad de LNG residual en el medio acuoso. En agua ultrapura obtuvieron 0.005 mg/g en polipropileno, 0.005 mg/g en poliestireno y 0.0041 mg/g en polietileno de alta densidad. En agua de mar, los resultados fueron 0.0051 mg/g en poliestireno y 0.0011 mg/g en polietileno de alta densidad. Señalan que las interacciones iónicas y el pH afectan negativamente la adsorción en agua marina.

Por otro lado, Burzio *et al.* (2024) emplearon lodos granulares aerobios y espuma generada durante la aireación para la remoción de

fármacos en agua, incluido el LNG. Observaron que los lodos adsorben los compuestos farmacéuticos con el tiempo debido a interacciones electrostáticas y a la afinidad lipofílica, logrando una remoción superior al 20 % de LNG y otros fármacos. Además, la espuma contribuyó a la eliminación mediante adsorción en la interfaz líquido-gas, alcanzando concentraciones 5.3 veces mayores que las iniciales.

Otra opción para el tratamiento son los procesos avanzados de oxidación, basados en la acción del radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), que reacciona con contaminantes presentes en el agua. Xiao-Yan *et al.* (2015) combinaron ultrasonido y KMnO_4 para la degradación de 17β -estradiol, estructuralmente similar al LNG. El ultrasonido (270 W a 25 °C durante 180 min) logró un 47.7 % de remoción, mientras que al añadir 5 mg/l de KMnO_4 durante 30 min, el porcentaje aumentó a 99.6 %. Esto se debe a la sinergia entre la cavitación ultrasónica y la oxidación química.

Nasuhoglu *et al.* (2012) evaluaron fotólisis y fotocátalisis para la eliminación de etinilestradiol (EE2) y LNG. En fotólisis, utilizando una lámpara germicida (UVC), obtuvieron una remoción del 60 % de EE2 tras 20 min. Al añadir 0.2 ng/l de TiO_2 (fotocátalisis), la remoción aumentó al 92 %. Para LNG, alcanzaron 82 % de eliminación tras 10 min de irradiación UVC, y al agregar TiO_2 , el porcentaje subió a 93.2 %. Después de 30 min de irradiación, el LNG no fue detectado. En agua residual sintética, las eficiencias se redujeron (de 60 a 41 % en EE2 y de 93.3 a 87 % en LNG) debido a la competencia con la materia orgánica y a la dispersión de la radiación.

También pueden emplearse procesos bioquímicos. Campos *et al.* (2019) evaluaron humedales artificiales para la remoción de levonorgestrel y otros disruptores endocrinos. Utilizaron tres humedales con grava como medio de soporte: uno plantado con *Cyperus isocladius*

(WL1), otro con *Eichhornia crassipes* (WL3) y uno sin macrófitas (WL2). Además, evaluaron un humedal con carbón de bambú y grava como medio de soporte, plantado con *Cyperus isocladius* (WLC). En agua residual sintética, las concentraciones de LNG fueron de 100 µg/l (baja) y 500 µg/l (alta). Con la concentración baja y un tiempo de retención de dos días, alcanzaron porcentajes de remoción de 90.7 % (WLC), 91.6 % (WL1), 77.4 % (WL2) y 80.2 % (WL3). Con cuatro días de retención, obtuvieron 98.6 % (WLC), 99.9 % (WL1), 100 % (WL2) y 97.4 % (WL3). Para concentraciones altas, en WLC y WL1 se observó una disminución al aumentar el tiempo de retención, pasando de 93.1 a 76.7 % y de 88.9 a 39.1 %, respectivamente, lo que puede atribuirse a la acumulación del compuesto. En WL2 y WL3, la remoción superó el 90 % en dos días y alcanzó el 100 % en cuatro días.

Existen diversos métodos para remover contaminantes emergentes como el levonorgestrel. Sin embargo, algunos, como la fotocatalisis o los procesos Fenton, requieren lámparas con longitudes de onda específicas o reactivos particulares, lo que incrementa los costos y dificulta su aplicación a escala industrial (Osuna-Laveaga & Moreno-Medran, 2024).

Conclusión

Los estudios revisados muestran que el levonorgestrel (LNG) está ampliamente distribuido en cuerpos de agua superficiales, subterráneos y en efluentes de plantas de tratamiento, con concentraciones que varían desde ng/l hasta µg/l, dependiendo de la región y del grado de depuración aplicado. Esta heterogeneidad refleja tanto las diferencias en el consumo de anticonceptivos basadas en LNG como la eficiencia desigual de las tecnologías empleadas en cada país.

A nivel ambiental, se ha demostrado que incluso a bajas concentraciones el LNG puede inducir alteraciones endocrinas en organismos acuáticos no objetivo, como peces y moluscos. Dichos efectos incluyen feminización, masculinización, alteraciones en el desarrollo gonadal y cambios en el comportamiento reproductivo, los cuales, al manifestarse en organismos clave dentro de la red trófica, pueden desencadenar efectos ecológicos en cascada.

En cuanto a los métodos de remoción, se han explorado alternativas, como la adsorción en microplásticos, procesos avanzados de oxidación, ozonización catalítica y uso de humedales. Sin embargo, la mayoría ha demostrado eficacia solo en condiciones de laboratorio o a escala piloto, lo que limita su aplicación en sistemas de tratamiento reales. A ello se suma el reto de la generación de subproductos durante procesos como la ozonización y la fotocatalisis, algunos de los cuales podrían resultar igual de persistentes o tóxicos.

Los hallazgos principales de esta revisión indican que:

- Presencia global: el LNG se ha reportado en América, Europa, Asia y África, con concentraciones que en algunos casos superan los $\mu\text{g/l}$.
- Efectos ecotoxicológicos: actúa como disruptor endocrino incluso en niveles bajos, alterando procesos reproductivos y de desarrollo en especies acuáticas.
- Limitaciones en la remoción: los sistemas convencionales resultan insuficientes; los procesos avanzados muestran potencial, pero requieren optimización, evaluación económica y escalamiento.
- Vacíos regulatorios: no existen límites ambientales establecidos para el LNG ni a nivel nacional ni internacional, lo que dificulta su control.

En consecuencia, se recomienda:

- Impulsar investigaciones orientadas al desarrollo de tecnologías de remoción más eficientes, sostenibles y escalables.
- Evaluar los efectos de la exposición crónica y multigeneracional al LNG en distintos niveles de la cadena trófica.
- Avanzar hacia la inclusión del LNG y otros fármacos con acción endocrina en la legislación ambiental, estableciendo límites protectores para la biodiversidad y la salud humana.

Este trabajo aporta al conocimiento al sistematizar la evidencia más reciente sobre la presencia, efectos y limitaciones en la remoción del LNG, visibilizando sus riesgos ambientales y regulatorios, así como las brechas en la investigación. La revisión muestra un consenso respecto a la persistencia y capacidad de este compuesto para alterar funciones endocrinas, pero también pone de manifiesto divergencias en la magnitud de los impactos reportados, atribuibles a diferencias metodológicas, especies de ensayo o condiciones ambientales. Entre los vacíos identificados destacan la escasez de estudios sobre efectos de exposición crónica e interacciones con otros contaminantes farmacéuticos que coexisten en escenarios reales.

En cuanto a la gestión, si bien existen avances tecnológicos prometedores, pocos estudios evalúan su aplicación a gran escala, su viabilidad energética y económica, o los riesgos asociados con subproductos. Estas limitaciones evidencian la necesidad de nuevas directrices de investigación orientadas a: a) ampliar los estudios ecotoxicológicos hacia escenarios crónicos y multiespecie; (b) incorporar enfoques de evaluación de riesgo que contemplen mezclas de contaminantes; c) desarrollar tecnologías de tratamiento costo-eficientes

y ambientalmente sostenibles, y d) establecer marcos regulatorios que reconozcan al LNG como contaminante prioritario.

Solo con un abordaje integrador entre ciencia, tecnología y política será posible cerrar la brecha entre el conocimiento científico y la gestión ambiental, a fin de reducir la exposición y los riesgos asociados con este compuesto, y garantizar la protección tanto de los ecosistemas acuáticos como de la salud humana.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca otorgada en la convocatoria Becas Nacionales para Estudios de Posgrado 2023-2 (número: 1224645), así como a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo brindado a través del Fondo para el Fortalecimiento de la Investigación, Vinculación y Extensión (FONFIVE-UAQ, 2025).

Referencias

Akanbi, C., Rotimi, D., Ojo, A., & Ojo, O. (2025). Endocrine-disrupting chemicals (EDCs) and epigenetic regulation in embryonic development: Mechanisms, impacts, and emerging trends. *Toxicology Reports*, 14, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101885>

- Almazrouei, B., Islayem, D., Alskafi, F., Catacutan, M., Amna, R., Nasrat, S., Sizerici, B., & Yildiz, I. (2023). Steroid hormones in wastewater: Sources, treatments, environmental risks, and regulations. *Emerging Contaminants*, 9, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100210>
- Angel-Ospina, A. C., & Machuca-Martínez, F. (2022). Ozonización catalítica en el tratamiento de contaminantes de preocupación emergente en aguas residuales: un análisis bibliométrico. *Ingeniería y Competitividad*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i1.11603>
- Arumugam, A., Lee, K., Ng, P., Shamsuddin, A., Zulkifli, A., & Goh, T. (2025). Pharmaceuticals as emerging pollutants: Implications for water resource management in Malaysia. *Emerging Contaminants*, 11, 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2025.100470>
- Babuji, P., Thirumalaisamy, S., Duraisamy, K., & Periyasamy, G. (2023). Human health risks due to exposure to water pollution: A review. *Water*, 15, 1-15. <https://doi.org/10.3390/w15142532>
- Bayode, A., Emmanuel, S., Sanni, S., Olalekan, O., Ore, O., Koko, D., & Omorogie, M. (2024). Current status and performance evaluation of emerging advanced remediation techniques for the removal of steroidal hormones in water. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 315-337. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.07.006>

- Broséus, R., Vincent, S., Aboulfadl, K., Daneshvar, A., Sauvé, S., Barbeau, B., & Prévost, M. (2009). Ozone oxidation of pharmaceuticals, endocrine disruptors and pesticides during drinking water treatment. *Water Research*, 43, 4707-4717. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.031>
- Bulawska, N., Sosnowska, A., Kowalska, D., Stepnik, M., & Puzyn, T. (2025). PFAS (per- and polyfluorinated alkyl substances) as EDCs (endocrine-disrupting chemicals): Identification of compounds with high potential to bind to selected terpenoid nuclear hormone receptors. *Chemosphere*, 370, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143967>
- Burzio, C., Mohammadi, A., Smith, S., Abadikhah, M., Svahn, O., Modin, O., Persson, F., & Wilén, B. (2024). Sorption of pharmaceuticals to foam and aerobic granular sludge with different morphologies. *Resources, Environment and Sustainability*, 15, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2024.100149>
- Calderón-Carabajo, V., Bermeo-Alarcón, W., Villavicencio-Caparó, E., & Orellana-Barros, M. (2024). Uso de la píldora anticonceptiva de emergencia a nivel mundial: revisión bibliográfica. *Revista de la Facultad de Salud y Servicios Sociales de la Universidad Estatal de Milagro*, 8(4), 4-12. <https://doi.org/10.29076/issn.2602-8360vol8iss14.2024pp4-12p>

- Calus-Makowska, K., Grosser, A., & Grobelak, A. (2023). Pharmaceutical contamination in wastewater treatment plants: Occurrence, challenges in detection and insights on high-performance liquid chromatography as an effective analytical tool in environmental matrices – A review. *Desalination and Water Treatment*, 305, 129-154. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29789>
- Campos, J., Queiroz, S., & Roston, D. (2019). Removal of the endocrine disruptors ethinyl estradiol, bisphenol A, and levonorgestrel by subsurface constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.320>
- Cifuentes, A., Ávila, J., & Rodríguez, J. (2016). Remoción de sustancias disruptoras endocrinas “levonorgestrel” en fuentes hídricas. *Logos, Ciencia y Tecnología*, 8(1), 183-197. <https://doi.org/10.22335/rict.v8i1.305>
- Contardo-Jara, V., Lorenz, C., Pflugmacher, S., Nützmann, G., Kloas, W., & Wiegand, C. (2011). Molecular effects and bioaccumulation of levonorgestrel in the non-target organism *Dreissena polymorpha*. *Environmental Pollution*, 159, 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.09.028>
- Das, R., & Raj, D. (2025). Sources, distribution, and impacts of emerging contaminants – A critical review on contamination of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, 1-
<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100602>

- Dias, R., Daam, M., Diniz, M., & Maurício, R. (2023). Drinking water treatment residuals, a low-cost and environmentally friendly adsorbent for the removal of hormones – A review. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 1-17.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104322>
- Dinehart, E., Lathi, R., & Aghajanova, L. (2020). Levonorgestrel IUD: Is there a long-lasting effect on return to fertility? *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*, 37, 45-52.
<https://doi.org/10.1007/s10815-019-01624-5>
- Durcik, M., Grobin, A., Roškar, R., Trontelj, J., & Masič, L. (2023). Estrogenic potency of endocrine disrupting chemicals and their mixtures detected in environmental water and wastewater. *Chemosphere*, 330, 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138712>
- Đurišić-Mladenović, N., Živančev, J., Antić, I., Rakić, D., Buljovčić, M., Pajin, B., Llorca, M., & Farré, M. (2024). Occurrence of contaminants of emerging concern in different water samples from the lower part of the Danube River middle basin – A review. *Environmental Pollution*, 363, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125128>
- Endler, M., Li, R., & Danielsson, K. (2022). Effect of levonorgestrel emergency contraception on implantation and fertility: A review. *Contraception*, 109, 8-18.
<https://doi.org/10.1016/j.contraception.2022.01.006>

- Farooq, S., Cai, R., McGettrick, J., Pean, E., Davies, M., Harrasi, A., Palmer, R., & Tizaoui, C. (2023). Visible light induced photocatalytic degradation of estrone (E1) with hexagonal copper selenide nanoflakes in water. *Process Safety and Environmental Protection*, 172, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.003>
- Fdez-Sanromán, A., Bernárdez-Rodas, N., Rosales, E., Pazos, M., González-Romero, E., & Sanromán, M. (2025). Biosensor technologies for water quality: Detection of emerging contaminants and pathogens. *Biosensors*, 15(3), 1-43. <https://doi.org/10.3390/bios15030189>
- Gal, B., López, M., Martín, A., & Prieto, J. (2007). *Bases de la fisiología*. (2ª ed.). Editorial Tébar Flores.
- Garduño-Jiménez, A., Durán-Álvarez, J., Ortori, C., Abdelrazig, S., Barret, D., & Gomes, R. (2023). Delivering on sustainable development goals in wastewater reuse for agriculture: Initial prioritization of emerging pollutants in the Tula Valley, Mexico. *Water Research*, 238, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119903>
- Gebbru, S., & Werkneh, A. (2024). Applications of constructed wetlands in removing emerging micropollutants from wastewater: Occurrence, public health concerns, and removal performances—A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48, 395-416. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.03.004>
- Goeury, K., Munoz, G., Duy, S., Prévost, M., & Sauvé, S. (2022). Occurrence and seasonal distribution of steroid hormones and bisphenol A in surface waters and suspended sediments of Quebec, Canada. *Environmental Advances*, 8, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100199>

- González-Flores, O., García-Juárez, M., & Domínguez-Ordoñez, R. (2024). Hormonas y neurociencias. *eNeurobiología*, 15. <https://doi.org/10.25009/eb.v15i39.2634>
- Grobin, A., Roskar, R., & Trontelj, J. (2024). The environmental occurrence, fate, and risks of 25 endocrine disruptors in Slovenian waters. *Science of the Total Environment*, 906, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167245>
- Hübner, U., Spahr, S., Lutze, H., Wieland, A., Rüting, S., Gernjak, W., & Wenk, J. (2024). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment—Guidance for systematic future research. *Heliyon*, 10, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402>
- Imparato, C., Bifulco, A., Silvestri, B., & Vitiello, G. (2022). Recent advances in endocrine disrupting compounds degradation through metal oxide-based nanomaterials. *Catalysts*, 12, 1-50. <https://doi.org/10.3390/catal12030289>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023). *Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica*. <https://www.inegi.org.mx/programas/enadid/2023/>
- Jiménez-Skrzypek, G., Hernández-Expósito, O., Hernández-Borges, J., & González-Sálamo, J. (2023). Sorption of levonorgestrel on polyethylene, polystyrene and polypropylene microplastics. *Chemosphere*, 335, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139042>

- Kaur, H., Kumar, G., Althobaiti, F., Aldhahrani, A., Usmani, S., & Bala, M. (2021). Prevalence of reproductive drugs usage in humans and animals: A pilot study in Patiala city of India. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28, 3727-3734. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.064>
- Knox, C., Wilson, M., Klinger, C. M., Franklin, M., Oler, E., Wilson, A., Pon, A., Cox, J., Chin, N. E. L., Strawbridge, S. A., García-Patiño, M., Kruger, R., Sivakumaran, A., Sanford, S., Doshi, R., Khetarpal, N., Fatokun, O., Doucet, D.,... & Wishart, D. S., (2024). DrugBank 6.0: The DrugBank Knowledgebase for 2024. *Nucleic Acids Research*, 52(D1), D1265-D1275. <https://doi.org/10.1093/nar/gkad976>
- Kumar, D., Kumar, R., Sharma, M., Awasthi, A., & Kumar, M. (2024). Global water quality indices: Development, implications and limitations. *Total Environment Advances*, 9, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200095>
- Letsoalo, M., Sithole, T., Mufamadi, S., Mazhandu, Z., Sillanpää, M., Kaushik, A., & Mashifana, T. (2023). Efficient detection and treatment of pharmaceutical contaminants to produce clean water for better health and environment. *Journal of Cleaner Production*, 387, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135798>
- Li, X., Shen, C., Jiang, W., Xi, Y., & Li, S. (2024a). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>

- Li, X., Yang, Y., Xu, H., Wang, J., Chen, Z., Liu, B., Fan, L., Fang, Y., & Li, F. (2024b). Norgestrel causes oxidative damage to the digestive gland of the clam *Macra veneriformis*. *Aquaculture Reports*, 37, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102250>
- Lin, L., Yang, H., & Xu, X. (2022). Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
- Liszewska, M., Czaja, K., Korcz, W., Lewinski, R., & Struncinski, P. (2024). Endocrine-disrupting chemicals—Pesticide regulatory issues from the EU perspective. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 154, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2024.105735>
- Liu, Y., Wang, F., Li, L., Fan, B., Kong, Z., Tan, J., & Li, M. (2025). The potential endocrine-disrupting effects of fluorinated pesticides and molecular mechanisms of EDPs in cell models. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289, 1-11, 117615. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117615>
- Loffler, P., Jonsson, O., Niemeyer, A., Dahlberg, A., Golovko, O., Gotlind, O., Haalck, I., Ahrens, L., Wiberg, K., & Yin, F. (2024). In situ active sampling of steroid hormones in water using a novel TIMGIE device: Validation and applicability. *Green Analytical Chemistry*, 11, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100143>

- Lozano, I., Pérez-Guzmán, C., Mora, A., Mahlkecht, J., López, C., & Cervantes-Avilés, P. (2022). Pharmaceuticals and personal care products in water streams: Occurrence, detection, and removal by electrochemical advanced oxidation processes. *Science of the Total Environment*, 827, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154348>
- Lucci, E., González-Salámo, J., Gentili, A., & Hernández-Borges, J. (2025). Determination of 16 emerging organic pollutants in sea sand using a modified QuEChERS method combined with UHPLC-MS/MS. *Marine Pollution Bulletin*, 217, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118143>
- Madesh, S., Gopi, S., Sau, A., Rajagopal, R., Namasivayam, S., & Arockiaraj, J. (2024). Chemical contaminants and environmental stressors induced teratogenic effect in aquatic ecosystem—A comprehensive review. *Toxicology Reports*, 13, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101819>
- Mannai, A., Hmida, L., Bouraoui, Z., Guerbej, H., Gharred, T., & Jebali, J. (2022). Does thermal stress modulate the biochemical and physiological responses of *Ruditapes decussatus* exposed to the progestin levonorgestrel? *Environmental Science and Pollution Research*, 29(56), 85211-85228. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21786-7>

- Masar, M., Ali, H., Yasir, M., Hanulikova, B., Sisman, O., Zitnan, M., Machovsky, M., Velazquez, J., Galusek, D., & Kuritka, I. (2024). Anelosimus eximius bioinspired ZnO nano cobwebs for environmental remediation of drugs and endocrine disruptors from water. *Chemosphere*, 365, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143327>
- Meece, F., Ahmed, G., Nair, H., Santhamma, B., Tekmal, R., Zhao, C., Pollok, N., Lara, J., Shaked, Z., & Nickisch, K. (2018). Esters of levonorgestrel and etonogestrel intended as single, subcutaneous-injection, long-lasting contraceptives. *Steroids*, 137, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2018.07.010>
- Meena, V., Swami, D., Chandel, A., Joshi, N., & Prasher, S. (2025). Selected emerging contaminants in water: Global occurrence, existing treatment technologies, regulations and associated risk. *Journal of Hazardous Materials*, 483, 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136541>
- Mendoza-Retana, S., Cervantes-Vázquez, M., Valenzuela-García, A., Guzmán-Silos, T., Orona-Castillo, I., & Cervantes-Vázquez, T. (2022). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(1), 115-126. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2789>
- Milquez, H., & Montagut, J. (2023). Impacto de los contaminantes emergentes en el entorno acuático y los tratamientos para el control y remoción en los cuerpos hídricos: revisión literaria. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3), 1-17. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.12551>

- Mínguez-Alarcón, L., Gaskins, A., Meeker, J., Braun, J., & Chavarro, J. (2023). Endocrine-disrupting chemicals and male reproductive health. *Fertility and Sterility*, 120(6), 1138-1149. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2023.10.008>
- Minh, T., Phuoc, D., Quoc, T., & Ngo, H. (2016). Presence of e-EDCs in surface water and effluents of pollution sources in Sai Gon and Dong Nai River basin. *Sustainable Environment Research*, 26(1), 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.001>
- Morais, H., Cruzeiro, C., Pardal, M., & Cardoso, P. (2023). Baseline progestins characterization in surface waters of three main Portuguese estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, 194, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115352>
- Mukherjee, U., & Maitra, S. (2024). Impact of metabolic disrupting chemicals on redox homeostasis, energy sensors receptor modulation, and hormone metabolism: A comparative account in teleost and mammalian model organisms. *Aquaculture and Fisheries*, 9, 455-485. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.05.004>
- Munzhelele, E., Ayinde, W., Gitari, W., Pindihama, G., & Mudzielwana, R. (2025). Occurrence of efavirenz, levonorgestrel, ibuprofen and diclofenac in wastewater of Limpopo Province, South Africa. *Heliyon*, 11, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41524>
- Nasuhoglu, D., Berk, D., & Yargeau, V. (2012). Photocatalytic removal of 17 α -ethinylestradiol (EE2) and levonorgestrel (LNG) from contraceptive pill manufacturing plant wastewater under UVC radiation. *Chemical Engineering Journal*, 185-186, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.012>

- Nelson, K., Mecha, C. A., Samuel, H., & Suliman, Z. (2025). Recent trends in the application of photocatalytic membranes in removal of emerging organic contaminants in wastewater. *Processes*, 13(1), 1-26. <https://doi.org/10.3390/pr13010163>
- Osuna-Laveaga, D., & Moreno-Medrano, D. (2024). Contaminantes emergentes: Problemática, impacto y su tratamiento por procesos de oxidación avanzada. *Estudios de la Ciénega*, 4(7), 165-170. <https://revistaestudiosdelacienega.com/ojs/index.php/rec/article/view/103>
- Osuoha, J., Anyanwu, B., & Ejileugha, C. (2025). Pharmaceuticals and personal care products as emerging contaminants: Need for combined treatment strategy. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100206>
- Panhwar, A., Jatoi, A., Mazari, S., Kandhro, A., Rashid, U., & Qaisar, S. (2024). Water resources contamination and health hazards by textile industry effluent and glance at treatment techniques: A review. *Waste Management Bulletin*, 1, 158-163. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.09.002>
- Piekutin, J., Bolinska, M., Kotowska, U., & Koszelnik, P. (2025). Removal of organic micropollutants (personal care products and endocrine disruptors) from water. *Desalination and Water Treatment*, 322, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101097>
- Profita, M., Fabbri, E., Vasumini, I., & Valbonesi, P. (2024). Endocrine disrupting chemicals in Italian drinking water systems: Insights from a three-year investigation combining chemical and effect-based tools. *Heliyon*, 10, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26785>

- Puebla-Barragán, S., & Reid, G. (2021). Probiotics in cosmetic and personal care products: Trends and challenges. *Molecules*, 26(5), 1-11. <https://doi.org/10.3390/molecules26051249>
- Robitaille, J., Denslow, N., Escher, B., Kurita-Oyamada, H., Marlatt, V., Martyniuk, C., Navarro-Martín, L., Prosser, R., Sanderson, T., Yargeau, V., & Langlois, V. (2022). Towards regulation of endocrine disrupting chemicals (EDCs) in water resources using bioassays: A guide to developing a testing strategy. *Environmental Research*, 202, 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112483>
- Rodríguez-Hernández, J., Araújo, R., López-Pacheco, I., Rodas-Zuluaga, L., González-González, R., Parra-Arroyo, L., Sosa-Hernández, J., Melchor-Martínez, E., Martínez-Ruiz, M., Barceló, D., Pastrana, L., Iqbal, H., & Parra-Saldívar, R. (2022). Environmental persistence, detection, and mitigation of endocrine disrupting contaminants in wastewater treatment plants: A review with a focus on a tertiary treatment technology. *Environmental Science Advances*, 1, 680-704. <https://doi.org/10.1039/d2va00179a>
- Rosendaal, F., Van Hylckama, V., Tanis, B., & Helmerhorst, M. (2003). Estrogens, progestogens and thrombosis. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, 1, 1371-1380. <https://doi.org/10.1046/j.1538-7836.2003.00260.x>
- Runnalls, T., Beresford, N., Kugathas, S., Margiotta-Casaluci, L., Scholze, M., Scott, A., & Sumpter, J. (2015). From single chemicals to mixtures: Reproductive effects of levonorgestrel and ethinylestradiol on the fathead minnow. *Aquatic Toxicology*, 169, 152-167. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.10.009>

- Shamshad, J., & Rehman, R. (2025). Innovative approaches to sustainable wastewater treatment: A comprehensive exploration of conventional and emerging technologies. *Environmental Science Advances*, 4, 189-222. <https://doi.org/10.1039/d4va00136b>
- Stiefel, C., & Stintzing, F. (2023). Endocrine-active and endocrine-disrupting compounds in food: Occurrence, formation and relevance. *NFS Journal*, 31, 57-92. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2023.03.004>
- Svensson, J., Mustafa, A., Fick, J., Schmitz, M., & Brunstöm, B. (2016). Developmental exposure to progestins causes male bias and precocious puberty in zebrafish (*Danio rerio*). *Aquatic Toxicology*, 177, 316-323. [10.1016/j.aquatox.2016.06.010](https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.06.010)
- Tanui, I., Kandie, F., Krauss, M., Piotrowska, A., Finckh, S., Kiprop, A., Hollert, H., Shahid, N., Liess, M., & Brack, W. (2025). Occurrence and potential risk of steroid hormones in selected surface water and wastewater treatment plants in western Kenya. *Environmental Pollution*, 364, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125623>
- Teigeler, M., Schaudien, D., Böhmer, W., Lange, R., & Schafers, C. (2021). Effects of the gestagen levonorgestrel in a life cycle test with zebrafish (*Danio rerio*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(3), 580-591. <https://doi.org/10.1002/etc.5008>

- Thrupp, T., Runnalls, T., Scholze, M., Kugathas, S., Kortenkamp, A., & Sumpter, J. (2018). The consequences of exposure to mixtures of chemicals: Something from “nothing” to “a lot from a little” when fish are exposed to steroid hormones. *Science of the Total Environment*, 619-620, 1482-1492.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.081>
- Varticovski, L., Stavera, D., McGowan, A., Raziuddin, R., & Hager, G. (2022). Endocrine disruptors of sex hormone activities. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 539, 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.mce.2021.111415>
- Vázquez-Tapia, I., Salazar-Martínez, T., Acosta-Castro, M., Meléndez-Castolo, K., Mahlkecht, J., Cervantes-Avilés, P., Capparelli, M., & Moran, A. (2022). Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico: A review. *Chemosphere*, 308, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>
- Vrettakos, C., & Bajaj, T. (2023). Levonorgestrel. En: *StatPearls*. StatPearls Publishing.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539737/>
- Wang, F., Xiang, L., Leung, K., Elsner, M., Zhang, Y., Guo, Y., Pan, B., Sun, G., An, T., Ying, G., Brooks, B., Hou, D., Helbling, D., Sun, J., Qiu, H., Vogel, T., Zhang, W., Gao, Y., Simpson, M., Luo, Y.,... & Tiedje, M. (2024). Emerging contaminants: A One Health perspective. *The Innovation*, 5(4), 1-31.
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100612>

- Wishart, D. S., Cheng, L. L., Copié, V., Edison, A. S., Eghbalnia, H. R., Hoch, J. C., Gouveia, G. J., Pathmasiri, W., Powers, R., Schock, T. B., Sumner, L. W., & Uchimiya, M. (2022). NMR and metabolomics—A roadmap for the future. *Metabolites*, 12(9), 1-20. <https://doi.org/10.3390/metabo12080678>
- Xiao-Yan, M., Kai, T., Qing-Song, L., Ya-Li, S., Yong-Jiong, N., & Nai-Yun, G. (2015). Degradation of 17 β -estradiol by combined ultrasound/KMnO₄ in an aqueous system. *Desalination and Water Treatment*, 53, 493-500. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.856344>
- Yang, W., Lu, T., Gong, J., Li, Q., Han, C., & Huang, J. (2025). Morphological, histopathological and brain transcriptomic assessment reveal reproductive toxicity and neurotoxicity in western mosquitofish (*Gambusia affinis*) exposed to levonorgestrel. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 296, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118153>