

Fuera del espacio operativo seguro de un nuevo límite planetario para sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS)

Ian T. Primos,^{*}Jana H. Johansson, Matthew E. Salter, Bo Sha y Martin Scheringer



Citar esto: *Reinar. ciencia Tecnología*2022, 56, 11172–11179



Leer en línea

ACCESO |



Métricas y más



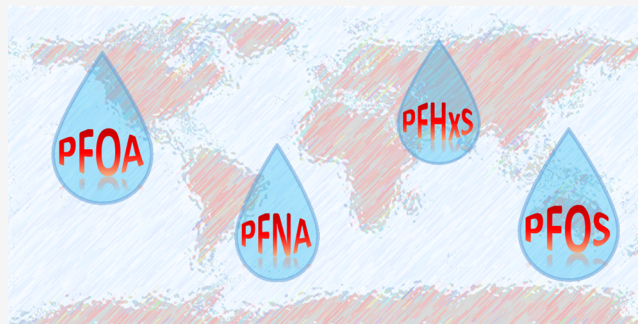
Recomendaciones de artículos

* información de soporte

RESUMEN: Se plantea la hipótesis de que la contaminación ambiental por sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) define un límite planetario separado y que este límite se ha superado. Esta hipótesis se prueba comparando los niveles de cuatro ácidos perfluoroalquilo seleccionados (PFAA) (es decir, ácido perfluorooctanosulfónico (PFOS), ácido perfluorooctanoico (PFOA), ácido perfluorohexanosulfónico (PFHxS) y ácido perfluorononanoico (PFNA)) en varios medios ambientales globales (es decir, agua de lluvia, suelos y aguas superficiales) con los niveles de referencia propuestos recientemente. Sobre la base de los cuatro PFAA considerados, se concluye que (1) los niveles de PFOA y PFOS en el agua de lluvia a menudo superan en gran medida el índice Lifetime Drinking de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE. UU.

Los niveles de advertencia de salud del agua y la suma de los cuatro PFAA mencionados anteriormente ($\Sigma 4$ PFAS) en el agua de lluvia a menudo están por encima de los valores límite de agua potable daneses también basados en $\Sigma 4$ PFAS; (2) los niveles de PFOS en el agua de lluvia suelen estar por encima del estándar de calidad ambiental para aguas superficiales de la Unión Europea continental; y (3) la deposición atmosférica también lleva a que los suelos globales se contaminen de manera ubicua y, a menudo, estén por encima de los valores de referencia holandeses propuestos. Por lo tanto, se concluye que la propagación global de estos cuatro PFAA en la atmósfera ha llevado a que se exceda el límite planetario de contaminación química. Los niveles de PFAA en la deposición atmosférica son especialmente poco reversibles debido a la alta persistencia de los PFAA y su capacidad para circular continuamente en la hidrosfera, incluso en los aerosoles marinos emitidos por los océanos.

PALABRAS CLAVE: PFAS, límite planetario, contaminación química, exposición ambiental



INTRODUCCIÓN

Un reciente artículo de revisión en *Ciencia* destacó la amenaza global que representa la contaminación plástica. Estas preocupaciones se basaron en la alta persistencia ambiental de los plásticos, la "pobre reversibilidad" relacionada y una variedad de efectos potenciales. Otros investigadores, incluidos nosotros mismos,^{2,3} han señalado preocupaciones similares relacionadas con sustancias no poliméricas altamente persistentes, pero estas preocupaciones no son tan obvias para el público en comparación con las preocupaciones con los plásticos. La preocupación pública relativamente alta con respecto a los plásticos posiblemente se deba a la visibilidad de los desechos plásticos en comparación con las sustancias no poliméricas.⁴ Claramente, tanto la contaminación plástica como la contaminación por sustancias no poliméricas altamente persistentes conducen a problemas globales similares. La persistencia generalmente se considera una propiedad peligrosa menos inmediata que la toxicidad, pero en realidad es el factor clave que permite que los problemas de contaminación se salgan de control.⁵ Esto se debe a que la persistencia permite que los productos químicos se propaguen a grandes distancias, provoca una exposición a largo plazo, incluso de por vida, y conduce a niveles cada vez más altos en el medio ambiente mientras continúan las emisiones. Es muy probable que estos niveles crecientes, tarde o temprano, produzcan efectos adversos. En tono rimbombante, microplástico está bajo consideración para la restricción en la UE

por la extrema persistencia de los plásticos y la irreversibilidad de la exposición provocada por las partículas plásticas en el medio ambiente.⁵

Recientemente, un grupo de científicos señaló las preocupaciones sobre la incapacidad de los análisis científicos para seguir el ritmo de la cantidad de productos químicos producidos y liberados en el medio ambiente.⁶ lo que limita la capacidad de descubrir nuevas amenazas ambientales a tiempo. Otros han señalado de manera similar la necesidad de una gestión precautoria de los productos químicos; un ejemplo notable es el informe, "Late Lessons from Early Warnings",⁷ donde se proporcionan muchos ejemplos históricos de problemas de contaminación global, a menudo asociados con sustancias químicas persistentes.

Una clase muy conocida de contaminantes, las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), también han aparecido recientemente en una revisión en *Ciencia*.⁸ La gran mayoría de las PFAS son altamente

Publicado: 2 de agosto de 2022



persistente (basado en la definición REACH de la UE según la cual una sustancia es persistente si es persistente en sí misma o tiene productos de degradación persistentes⁹), y esto se ha visto como base para gestionarlos como una clase química.³ Mientras que el artículo de revisión en *Ciencia* señaló la ubicuidad y la alta persistencia de PFAS, no señaló los riesgos generalizados y poco reversibles actuales asociados incluso con exposiciones de bajo nivel a PFAS. Aquí se plantea la hipótesis de que debido a la propagación mundial de PFAS, la irreversibilidad de la exposición a PFAS y los efectos biológicos asociados, se ha excedido un nuevo límite planetario para PFAS.

Desafortunadamente, aunque hay muchos miles de sustancias definidas como PFAS en uso (las PFAS incluyen cualquier sustancia con al menos un $-CF_2-$ o $-CF_3$ resto en su estructura¹⁰), la comprensión actual de los impactos biológicos se basa principalmente en estudios de cuatro ácidos perfluoroalquílicos (PFAA), a saber, ácido perfluorooctanosulfónico (PFOS), ácido perfluorooctanoico (PFOA), ácido perfluorohexanosulfónico (PFHxS) y ácido perfluorononanoico (PFNA). Mientras que todos los PFAS se pueden agrupar en una clase sobre la base de su alta persistencia,³ no es posible agrupar muchos de ellos según el riesgo biológico debido a la escasez de datos sobre exposición y efectos para la mayoría de las PFAS.¹¹ Por lo tanto, debido a las lagunas de datos, el análisis que se presenta aquí se basa únicamente en los cuatro PFAA mencionados anteriormente. A continuación, proporcionamos cuatro piezas de evidencia para respaldar la afirmación de que, incluso considerando solo estos cuatro PFAA, se ha excedido el nuevo límite planetario para PFAS.

En el concepto de límite planetario, se intenta estimar los límites de “un espacio operativo seguro para la humanidad con respecto al funcionamiento del Sistema Tierra”.^{12,13} La contaminación química fue uno de los nueve impactos antropogénicos originales para los cuales se postularon los límites planetarios porque puede influir en el funcionamiento del sistema terrestre: “(i) a través de un impacto global y ubicuo en el desarrollo fisiológico y la demografía de los humanos y otros organismos con impactos finales en el ecosistema funcionamiento y estructura y (ii) actuando como una variable lenta que afecta otros límites planetarios”.^{12,13} Steffen et al. cambiaron el nombre del límite de “contaminación química” por el de “entidades nuevas” (NE)¹⁴ donde los NE se definen como “sustancias nuevas, formas nuevas de sustancias existentes y formas de vida modificadas”, incluidos “productos químicos y otros tipos nuevos de materiales de ingeniería u organismos no conocidos previamente en el sistema terrestre, así como elementos naturales (por ejemplo, metales) movilizados por actividades antropogénicas”. Varios grupos de científicos,^{6,15, dieciséis} han señalado los desafíos en la cuantificación del límite planetario para los NE, y recientemente se propuso utilizar en su lugar varias variables de control para determinar si se excede el límite.⁶ En nuestra opinión, es una tarea insuperable cuantificar el límite de todos los NE porque (1) existen brechas de datos críticas para una gran proporción de los NE existentes, (2) se generan continuamente NE de varios tipos y mezclas de NE y liberados al medio ambiente, y (3) existen múltiples efectos posibles (no solo efectos tóxicos) que los NE individuales o grupos/mezclas de NE pueden causar. Varios de los límites planetarios existentes están relacionados con la liberación de NE. Por ejemplo, los límites para el “agotamiento del ozono estratosférico” y el “cambio climático” abordan la liberación de sustancias que agotan el ozono y gases con potencial de calentamiento global, respectivamente. Por lo tanto, en lugar de ser un límite planetario único, el límite de los NE se puede considerar como un marcador de posición para los límites planetarios múltiples de los NE que pueden

surgir. Aquí se argumenta que las PFAS definen un nuevo límite planetario para las NE.

Argumentamos que si se exceden los avisos de salud del agua potable y otras pautas diseñadas para proteger la salud humana debido a la propagación ambiental global de PFAS, entonces existe un peligro real de que ocurran efectos en la salud global (por ejemplo, que afecten la fisiología humana) y que puede ser argumentó que se excede el límite planetario para PFAS. No consideramos necesario demostrar la prevalencia de los efectos en la salud humana a nivel mundial debido a la exposición a PFAS para probar nuestra hipótesis, y esperamos que tales efectos generalizados en la población humana nunca se observen.

ADVERTENCIAS DE SALUD PARA EL AGUA POTABLE DE POR VIDA DE LA EPA DE EE. UU. PARA PFOS Y PFOA A MENUDO SON INFERIORES A SUS RESPECTIVOS NIVELES EN AGUA DE LLUVIA Y EL VALOR LÍMITE DE AGUA POTABLE EN DANÉS PARA Σ4 PFAS TAMBIÉN ES A MENUDO INFERIOR AL NIVEL DE Σ4 PFAS EN AGUA DE LLUVIA

En junio de 2022, la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA, por sus siglas en inglés) anunció el lanzamiento de avisos de salud para cuatro PFAS, incluidos avisos de salud de agua potable de por vida no reglamentarios provisionales actualizados para PFOA y PFOS de 4 pg/L y 20 pg/L, respectivamente.¹⁷ Los avisos de salud de la EPA de EE. UU. identifican la concentración de sustancias químicas en el agua potable por debajo de la cual no se prevé que ocurran efectos adversos para la salud y, a diferencia de los avisos anteriores, se basan en estudios de epidemiología humana en poblaciones expuestas a estos productos químicos. El efecto no cancerígeno más sensible y la base para la evaluación de riesgos detrás de los avisos de salud provisionales actualizados para PFOA y PFOS es la supresión de la respuesta a la vacuna (disminución de las concentraciones de anticuerpos séricos) en los niños. Los avisos de salud de agua potable de por vida no reglamentarios anteriores de la EPA de EE. UU. eran de 70 ng/L para la suma de las concentraciones de PFOS y PFOA. En 2020, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) publicó su Opinión sobre los riesgos para la salud humana derivados de la presencia de PFAS en los alimentos.¹⁸ y propuso una ingesta semanal tolerable (TWI) grupal de 4,4 ng/kg de peso corporal para la suma de PFOA, PFNA, PFHxS y PFOS. Sobre la base de los estudios disponibles en animales y humanos, los efectos sobre el sistema inmunitario se consideraron los más críticos para la base de la evaluación de riesgos.¹⁸ En junio de 2021, sobre la base del TWI en el Dictamen de la EFSA, la Agencia Danesa de Protección Ambiental endureció sus valores límite de agua potable y anunció que el agua potable no debe contener más de 2 ng/L de Σ4 PFAA.¹⁹

Las pautas de agua potable de PFAS han disminuido progresivamente en los últimos 22 años.²⁰ Por ejemplo, en los EE. UU., la pauta de agua potable de PFOA para Virginia Occidental fue de 150 000 ng/L,²⁰ que es más alto por un factor de 37.5 millones que el aviso de por vida de agua potable de la EPA de EE. UU. recientemente anunciado para PFOA de 4 pg/L. Como resultado de esta disminución, las pautas internacionales de agua potable para PFAS ahora están cerca o incluso por debajo de los niveles de precipitación. Los seres humanos que residen en áreas industrializadas del mundo no suelen beber agua de lluvia en la vida moderna, sin embargo, debe ser una expectativa razonable que el medio ambiente esté lo suficientemente limpio como para que el agua de lluvia y el agua de los arroyos de montaña alimentados por la precipitación sean seguras para beber. Además, en algunas partes del mundo, especialmente en algunas regiones áridas y tropicales, el agua de lluvia sigue siendo una fuente importante de agua potable.²¹

En **Figura 1**, los niveles de PFAS en la precipitación se revisan y comparan con los avisos de agua potable para Dinamarca y

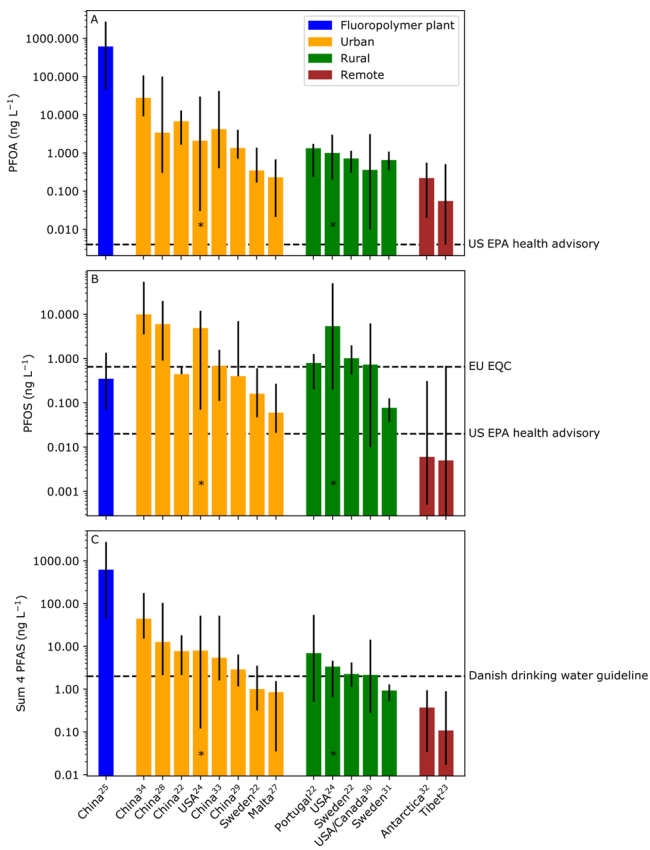


Figura 1. Niveles de (A) PFOA, (B) PFOS y (C) $\Sigma 4$ PFAA (PFOA + PFNA + PFHxS + PFOS) en deposición húmeda recolectada en varios lugares del mundo desde 2010 hasta el presente. Para un estudio,²⁴ no fue posible derivar valores medianos y, por lo tanto, se proporcionan valores medios (indicados por *). La línea discontinua en (A) muestra el aviso de salud de la EPA de EE. UU. para PFOA (0,004 ng/L), las líneas discontinuas en (B) muestran el EQC de la UE para PFOS (es decir, 0,65 ng/L) y el aviso de salud de la EPA de EE. UU. PFOS (es decir, 0,020 ng/L), y la línea discontinua en (C) muestra la pauta danesa de agua potable para $\Sigma 4$ PFAA (es decir, 2 ng/L). Las barras indican valores medianos y las barras de incertidumbre indican valores mínimos y máximos. Las mediciones de deposición húmeda para los PFAA $\Sigma 4$ se ordenan de mayor a menor (de izquierda a derecha) y se clasifican en cuatro categorías ("Planta de fluoropolímeros" indica que las muestras se tomaron cerca de una planta de fabricación de fluoropolímeros; "Urbano" indica que las muestras se tomaron en ciudades o regiones urbanizadas; "Rural" indica que las muestras se tomaron en lugares rurales menos poblados, y "Remoto" indica que las muestras se tomaron en regiones con poblaciones humanas muy bajas o inexistentes). Algunos estudios tomaron muestras de la deposición húmeda en múltiples ubicaciones dentro de una de las cuatro categorías y, por lo tanto, los datos de estas ubicaciones individuales se agrupan en varias barras. Los datos sin procesar y una descripción del tratamiento de datos para la preparación de figuras se proporcionan en el [información de soporte](#).

la EPA de EE. UU., que son los avisos más estrictos conocidos a nivel mundial. Los criterios de inclusión/exclusión de estudios para la selección que se muestran en **Figura 1** son (1) solo se consideran los estudios que tienen muestras de precipitación, (2) el muestreo y el análisis se realizaron después de 2010, y (3) se proporcionaron datos sin procesar o estadísticas descriptivas (rango y mediana o concentración media) de los datos. Solo se incluyeron datos de 2010 o posteriores porque (1) estos datos son más recientes y más

desde la eliminación gradual de 3M de las químicas de PFAS de cadena larga entre 2000 y 2002 y (2) hubo grandes mejoras analíticas a principios de la década de 2000, como lo demuestra la mejora en el cuarto estudio internacional entre laboratorios de 2011 en comparación con los tres estudios internacionales entre laboratorios realizados entre 2004 y 2009.²² Se excluyeron cuatro estudios de precipitación porque, aunque los estudios se publicaron después de 2010, el análisis se realizó antes de 2010 (ver [información de soporte](#)).

En **Figura 1A**, los niveles de PFOA en el agua de lluvia superan con creces el aviso de salud para el agua potable de la EPA de los EE. UU. que es aproximadamente 14 veces mayor que el aviso). En **Figura 1B**, se muestra que los niveles de PFOS en el agua de lluvia a menudo exceden el aviso de salud del agua potable de la EPA de los EE. UU. para PFOS, excepto por dos estudios realizados en regiones remotas (en el Tíbet y la Antártida). En **Figura 1C**, se revisan los niveles de $\Sigma 4$ PFAA en la precipitación,²³⁻³⁴ se muestra que, en regiones pobladas (definidas como "urbanas" y "rurales" en **Figura 1**), los niveles superarían a menudo los valores límite daneses para el agua potable. En regiones remotas, con poblaciones humanas bajas, los PFAA $\Sigma 4$ en el agua de lluvia también superan a menudo el valor límite danés para el agua potable (**Figura 1C**). En Suecia, se realizó un mapeo nacional de PFAS en aguas potables y sin tratar municipales en 2021.³⁵

Se encontró que aproximadamente el 49 % del agua potable en Suecia contenía Σ PFAS > 5 ng/L, y se demostró que los 4 PFAA incluidos en la evaluación de riesgos de la EFSA contribuyeron con una gran fracción del total de PFAS medido. En comparación con los EE. UU., se estimó recientemente³⁶ que a una concentración de 5 ng/L para PFOA + PFOS combinados, entre 21 y 123 millones de personas o entre el 7 y el 41 % de la población de los EE. UU. se estimó en 76-205 millones de personas o 25-68% de la población. La directriz sueca de agua potable para la acción de mitigación (90 ng/L para $\Sigma 11$ PFAS)³⁷ se basó anteriormente en la opinión científica de la EFSA de 2008 sobre PFOS y PFOA³⁸ y recientemente se redujo a 4 ng/L de $\Sigma 4$ PFAA,^{37a} a la luz del dictamen de la EFSA de 2020 sobre PFAS.¹⁸

Los avisos de salud de la EPA de EE. UU. parecen no ser alcanzables en la práctica sin la inversión de enormes costos de limpieza en las plantas de tratamiento de agua potable dado que la mayoría de las fuentes de agua potable en el planeta tendrán niveles de PFAS por encima de los niveles de aviso. Los avisos de salud de la EPA de EE. UU. no son reglamentarios, pero demostrar el cumplimiento de estas pautas sería un desafío analítico porque los métodos modernos generalmente no pueden alcanzar los límites de detección de PFOA por debajo de 4 pg/L en el agua potable. Los laboratorios de investigación modernos tienen límites de detección tan bajos como 80 pg/L para PFOA y 100 pg/L para PFOS, respectivamente, en el agua potable³⁹ y los laboratorios comerciales tienden a tener límites de detección y cuantificación mucho más altos (p. ej., Eurofins tiene límites de cuantificación de aproximadamente 1 ng/L para PFAS en agua⁴⁰). Alcanzar límites de detección de <4 pg/L para PFOA en el agua potable sería teóricamente posible dado que los niveles bajos de pg/L se han medido previamente en muestras de agua del océano, incluso hace más de una década.⁴¹ Lograr un límite de detección tan bajo en el agua potable probablemente requeriría la extracción de volúmenes de muestra más grandes que los típicos y/o la inyección de volúmenes de extracto más grandes en el instrumento. Por ejemplo, el método publicado³⁹ que logró límites de detección de 80 pg/L para PFOA se basó en muestras de 10 mL y se pudo escalar para lograr límites de detección de <4 pg/L con volúmenes de muestra más grandes. También será importante tener muy bajo

contaminación del blanco porque, en última instancia, los niveles del blanco y la garantía de calidad asociada determinarán los límites de detección que se pueden lograr.

ESTÁNDAR DE CALIDAD AMBIENTAL (EQS) DE LA UNIÓN EUROPEA (UE) PARA PFOS PARA AGUA DULCE A MENUDO ES INFERIOR A LOS NIVELES EN AGUA DE LLUVIA

En 2010, el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM) de los Países Bajos derivó una concentración máxima permisible (MPC) basada en el riesgo para PFOS en agua dulce de 0,65 ng/L en función del potencial de intoxicación secundaria en humanos debido al consumo de pescado.⁴² El MPC es un nivel de referencia y se define como "el nivel en el que no se esperan efectos nocivos, en función de las concentraciones medias anuales". En 2013, el PFOS y sus derivados se incluyeron en la Directiva 2013/39/UE y, por lo tanto, se consideraron "sustancias peligrosas prioritarias" en virtud de la Directiva Marco del Agua (DMA) (2000/60/EC). Se establecieron, entonces, Estándares de Calidad Ambiental (EQC) para PFOS y sus derivados para aguas dulces, aguas marinas y biota. El estándar de calidad ambiental promedio anual de la UE (AA-EQS) para PFOS en aguas superficiales continentales de la UE se estableció en 0,65 ng/L, siguiendo el mismo razonamiento utilizado anteriormente por RIVM. Se sabe que las concentraciones de PFOS en agua dulce exceden regularmente el EQS,^{43,44} pero potencialmente más preocupante es que los niveles de PFOS en agua de lluvia son iguales o incluso superan el EQS. Como puede verse en Figura 1A), los niveles de PFOS en el agua de lluvia en las regiones pobladas del hemisferio norte en algunos casos superan o se acercan al EQC de 0,65 ng/L. Por lo tanto, independientemente de las entradas de aguas residuales a las aguas dulces, es probable que siempre se alcance el EQC para PFOS en las regiones pobladas, y con frecuencia se supere, como resultado de la presencia generalizada de PFOS en la deposición atmosférica.

Recientemente, las autoridades de la región metropolitana de Estocolmo aconsejaron al público no comer pescado de los lagos de la región.⁴⁵ Esto no se basó en la superación de los EQS de 0,65 ng/L para PFOS y el envenenamiento secundario asociado, sino más bien en la superación de un nivel de acción temporal para peces de 9,1 ng/g de PFOS establecido por la Agencia Sueca de Alimentos.³⁷ El nivel de acción sueco se considera temporal porque se revisará en un futuro próximo.³⁷ Según el dictamen científico de la EFSA de 2020 sobre los riesgos para la salud humana derivados de la presencia de PFAS en los alimentos.¹⁸ Dado que el EQC de agua dulce de la UE se basa en el consumo secundario en humanos debido al consumo de pescado, existen motivos para revisar el EQS en función del reciente dictamen de la EFSA.¹⁸ Tal revisión de las EQS de agua dulce probablemente daría como resultado una mayor reducción de su nivel y bajaría las EQS en la suma de PFOA, PFNA, PFHxS y PFOS.

LAS DIRECTRICES HOLANDEASAS PARA PFAS EN SUELOS Y MATERIALES DE DRAGADO FUERON IMPOSIBLES DE APLICAR DEBIDO A LA UBICUIDAD DE PFAS EN LA DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA

Directrices recientes establecidas en julio de 2018 por el Ministerio de Infraestructura de los Países Bajos establecieron que el suelo y el material de dragado no deben contener concentraciones de >0,1 mg/kg de peso seco (pd) de PFOS o PFOA.⁴⁶ Como los niveles de PFAS en los suelos a menudo superaban estos valores de referencia, el 70 % de los proyectos de construcción que implicaban la remoción de suelos y el relleno con material excavado se detuvieron en los Países Bajos.⁴⁷ Siguiendo a los constructores

protestas, el gobierno holandés relajó las pautas.⁴⁸ Solo unos pocos estudios han informado niveles de PFAS en suelos que no tienen una fuente local conocida de PFAS cercana. Por ejemplo, Rankin et al. informaron concentraciones medianas de PFOS y PFOA de 0,47 y 0,12 mg/kg dw para suelos globales,⁴⁹ mientras que Sorøngård et al. informaron concentraciones medianas de PFOS y PFOA de 0,39 y 0,38 mg/kg dw en suelos forestales suecos.⁵⁰ Estos niveles de suelo informados ilustran la imposibilidad de cumplir con las pautas holandesas antes de que fueran revisadas al alza. La contaminación de fondo del suelo con PFAS es nuevamente el resultado de la ubicuidad ambiental de los PFAA en la deposición atmosférica. Si los suelos se modifican con lodos de depuradora o biosólidos, que es una práctica común en la agricultura en muchos países, los niveles del suelo se elevarán aún más y las PFAS pueden filtrarse para contaminar las aguas superficiales y subterráneas, incluidas las fuentes de agua potable. Sobre la base de las preocupaciones sobre la contaminación del suelo con PFAS, el estado de Maine, EE. UU., aprobó un proyecto de ley que prohíbe el uso de biosólidos en aplicaciones terrestres a menos que, en el caso improbable, se pueda demostrar que están libres de PFAS.⁵¹

CICLO DE PFAA EN LA HIDROSFERA DEL MUNDO SIGNIFICA QUE LOS NIVELES DE PFAA EN EL AGUA DE LLUVIA SERÁN PRÁCTICAMENTE IRREVERSIBLE

Hasta hace poco, la creencia común era que los PFAA finalmente se lavarían en los océanos, donde permanecerían para diluirse en una escala de tiempo de décadas.⁵² Un estudio reciente,⁵³ sin embargo, ha proporcionado evidencia de que ciertos PFAS, en particular los PFAA de cadena larga, que incluyen los 4 PFAA incluidos en el TWI de la EFSA, pueden enriquecerse significativamente en aerosoles marinos (SSA) y transportarse en la atmósfera de regreso a la costa donde se depositarán, y contaminan las aguas dulces, las aguas potables y los suelos superficiales.

Este ciclo global continuo de PFAA en la hidrosfera conducirá a la continua superación de las pautas mencionadas anteriormente. Este hallazgo es particularmente preocupante porque (1) los valores de referencia basados en efectos biológicos han disminuido continuamente^{20y} es posible que aún no haya tocado fondo a medida que surge más evidencia científica, (2) las pautas actualmente se basan solo en algunas de las sustancias de la gran clase de PFAS,^{10y} (3) no hay evidencia de la disminución de las concentraciones ambientales y, por lo tanto, de las exposiciones de PFAS derivadas del medio ambiente.⁵⁴

DISCUSIÓN

Los PFAS son un problema de límite planetario basado en los criterios descritos por MacLeod et al.,^{55a} saber, (1) la contaminación difusa de PFAS es global en su escala, (2) los efectos solo se están descubriendo ahora después de que los contaminantes ya se han propagado globalmente, y (3) ahora que se han descubierto los efectos, son poco reversibles o irreversibles. Como ocurre con la mayoría de los productos químicos en uso,⁶ Debido a la falta de información, es imposible hacer una evaluación completa de la amenaza del límite planetario para los muchos miles de PFAS de la clase. Sin embargo, en base a los cuatro PFAA considerados aquí, se concluye que en muchas áreas habitadas por humanos se ha excedido el límite planetario de PFAS en función de los niveles en el agua de lluvia, el agua superficial y el suelo, y todos estos medios están ampliamente contaminados recientemente. Niveles de referencia propuestos. Aunque las emisiones globales de estos 4 PFAA se han reducido en los últimos años en la mayoría de los países,⁵²⁵⁶ estas sustancias

continúan permaneciendo en el medio ambiente debido a su alta persistencia y seguirán ciclando continuamente en la hidrosfera.

El análisis presentado aquí se ha referido deliberadamente a los valores de referencia de PFAS más estrictos a nivel internacional, que no son representativos de los valores de referencia internacionales para PFAS. Existe, por ejemplo, un gran desacuerdo a nivel internacional, e incluso entre estados individuales en los EE. UU.,²⁰ con respecto a las pautas de agua potable para PFAS. Las diversas pautas fueron desarrolladas por diferentes científicos en diferentes momentos y las evaluaciones de riesgo a menudo se basan en diferentes puntos finales. Sin embargo, surge una tendencia temporal clara e inquietante, ya que las pautas más recientes son varios órdenes de magnitud más bajas que las pautas más antiguas.²⁰ Las pautas en los EE. UU. y Europa se han reducido recientemente como resultado de la evidencia emergente de la supresión de la respuesta a la vacuna en los niños.⁵⁷ No intentamos determinar cuál de las muchas pautas (ver compilación⁵⁸) se basa en la evidencia empírica más fuerte sobre los efectos porque tal juicio está fuera de nuestra experiencia. El punto que queremos señalar es que los avisos de salud basados en el riesgo más estrictos a menudo están muy por debajo de los niveles ambientales, y esto debería ser motivo de preocupación y una razón para tomar medidas estrictas.

Aunque las PFAS están presentes globalmente en todos los medios y ubicaciones ambientales, todavía hay algunas áreas del planeta donde los niveles ambientales de PFAS siguen siendo relativamente bajos. Sin embargo, incluso en estas regiones remotas y escasamente pobladas, como la Antártida y la meseta tibetana, se superan las pautas más estrictas de PFAS (Figura 1). Estas áreas no pueden albergar grandes poblaciones y no están disponibles para asentamientos a los que podría trasladarse la mayor parte de la población. En la mayoría de las demás áreas, se superan los valores de referencia de PFAS y esto implica impactos potenciales en la salud pública: incidencias más altas (notablemente en grandes poblaciones, es decir, muchos casos) de efectos relacionados con PFAS, como una respuesta inmune reducida, pero también altos costos adicionales para la atención médica, y, cuando sea posible, remediación.⁵⁹ Además, en muchos casos, los impactos relacionados con PFAS ocurren en combinación con otros problemas ambientales, como la escasez de agua o la contaminación por otros contaminantes.

Finalmente, concluimos que las PFAS definen un nuevo límite planetario que se ha excedido, según los niveles de PFAS en los medios ambientales que se encuentran ubicuamente por encima de los niveles de referencia. Independientemente de si uno está de acuerdo o no con nuestra conclusión de que se excede el límite planetario para PFAS, es muy problemático que en todas partes de la Tierra donde residen humanos, los avisos de salud propuestos recientemente no puedan lograrse sin una gran inversión en tecnología avanzada de limpieza. De hecho, aunque el PFOS y el PFOA fueron eliminados por uno de los principales fabricantes (3M) hace 20 años, pasarán décadas antes de que los niveles en el agua terrestre y las precipitaciones se acerquen a niveles bajos de picogramos por litro. Además, los problemas asociados con PFOS, PFOA,⁶⁰ en vista de los impactos de la huella química de la humanidad en la salud planetaria, es de gran importancia evitar una mayor escalada del problema de la exposición ambiental y humana a gran escala y a largo plazo al PFAS mediante la restricción rápida de los usos de PFAS siempre que sea posible.⁶¹

Además, como hemos dicho nosotros mismos³ y otros⁷ antes, la sociedad no debería repetir continuamente los mismos errores con otros químicos persistentes.

CONTENIDO ASOCIADO

* información de soporte

La información de apoyo está disponible de forma gratuita en <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c02765>.

Datos sin procesar y referencias utilizados para crear Figura 1 (XLSX)

FORMACIÓN DEL AUTOR

Autor correspondiente

Ian T. Primos – *Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad de Estocolmo, SE-10691 Estocolmo, Suecia;*
orcid.org/0000-0002-7035-8660; Correo electrónico:
ian.primos@aces.su.se

Autores

Jana H. Johansson – *Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad de Estocolmo, SE-10691 Estocolmo, Suecia;*
orcid.org/0000-0002-6194-1491

Mateo E. Salter – *Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad de Estocolmo, SE-10691 Estocolmo, Suecia;*
orcid.org/0000-0003-0645-3265

Bo-Sha – *Departamento de Ciencias Ambientales, Estocolmo Universidad, SE-10691 Estocolmo, Suecia;* orcid.org/0000-0002-2176-0709

Martín Scheringer – *Instituto de Biogeoquímica y Dinámica de contaminantes, ETH Zürich, 8092 Zürich, Suiza; RECETOX, Universidad de Masaryk, 625 00 Brno, República Checa;* orcid.org/0000-0002-0809-7826

La información de contacto completa está disponible en: <https://pubs.acs.org/10.1021/acs.est.2c02765>

notas

Los autores declaran no tener ningún interés financiero en competencia.

Biografía



Ian Cousins es profesor de Química Orgánica Ambiental en el Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Estocolmo en Suecia. Es originario del Reino Unido pero vive en Suecia y trabaja en la Universidad de Estocolmo desde hace más de 20 años. El Prof. Cousins tiene un B.Sc. en Química de la Universidad de York y un Ph.D. en Ciencias Ambientales de la Universidad de Lancaster. Es bien conocido por su investigación sobre las fuentes, el transporte y el destino, y las vías de exposición de las PFAS. En los últimos años, el Prof. Cousins ha escrito una serie de artículos relacionados con políticas impulsados por su preocupación por el uso continuado de PFAS. Esta Perspectiva es su última contribución. El Prof. Cousins coordina el proyecto PERFORCE3,

Acciones Curie (Acuerdo de Subvención No. 860665). También es editor asociado de las revistas *Environmental Science and Technology* y *Environmental Au*.

RESIONES DE GRATITUD

ITC, JHJ, MES y BS quisieran agradecer a FORMAS, un consejo de investigación del gobierno sueco para el desarrollo sostenible (Subvención 2016-00644), y al Consejo Sueco de Investigación, Vetenskapsrådet (Subvención 2016-04131) por su apoyo financiero. El ITC también quisiera agradecer la financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención 101036756 (ZeroPM). MS agradece la financiación de la infraestructura de investigación RECETOX (Ministerio de Educación, Juventud y Deportes de la República Checa, LM2018121), el proyecto CETOCOEN PLUS (CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_003/0000469) y el CETO-COEN EXCELLENCE Teaming 2 proyecto apoyado por el Ministerio checo de Educación, Juventud y Deportes (No CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_043/0009632). TIC y EM quisiera agradecer al Global PFAS Science Panel (GPSP) y a la Tides Foundation (Subvención 1807-59084) por su apoyo. Agradecemos a Gretta Goldenman, Matthew MacLeod y tres revisores anónimos por sus valiosos comentarios sobre el manual.

criptografía

REFERENCIAS

- (1) MacLeod, M.; Arpa, HPH; Tekman, MB; Jahnke, A. La amenaza global de la contaminación plástica. *Ciencia* 2021, 373(6550), 61-65.
- (2) primos, TI; Ng, CA; Wang, Z.; Scheringer, M. ¿Por qué la alta persistencia por sí sola es una causa importante de preocupación? *Reinar. Sci.: Procesos Impactos* 2019, 21(5), 781-792.
- (3) primos, TI; DeWitt, JC; Glugé, J.; Goldenman, G.; Herzke, D.; Lohmann, R.; Ng, CA; Scheringer, M.; Wang, Z. La alta persistencia de PFAS es suficiente para su gestión como clase química. *Reinar. Sci.: Procesos Impactos* 2020, 22(12), 2307-2312.
- (4) Cantidades. *Abordar lo visible y lo invisible para cerrar el bucle plástico*. <https://quantis-intl.com/ocean-plastics/> (consultado el 2022-04-07).
- (5) ECHA Agencia Europea de Sustancias Químicas. *Registro de intenciones de restricción hasta resultado microplásticos*. <https://echa.europa.eu/sv/registro-de-intenciones-de-restriccion/-/dislist/details/0b0236e18244cd73> (consultado el 23-02-2022).
- (6) Persona, L.; Carney Almroth, BM; Collins, CD; Cornell, S.; de Wit, CA; Diamante, ML; Fantke, P.; Hassellöv, M.; MacLeod, M.; Ryberg, MW; Søgaard Jørgensen, P.; Villarrubia-Gómez, P.; Wang, Z.; Hauschild, MZ Fuera del espacio operativo seguro del límite planetario para entidades novedosas. *Reinar. ciencia Tecnología* 2022, 56(3), 1510-1521.
- (7) Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). *Lecciones tardías de las alertas tempranas: ciencia, precaución, innovación*, Publicación EEA Report No 1/2013; 2013. <https://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2>.
- (8) Evich, MG; Davis, MJB; McCord, JP; Acrey, B.; Awkerman, JA; Knappe, DRU; Lindström, AB; Speth, TF; Tebes-Stevens, C.; Strynar, MJ; Wang, Z.; Weber, EJ; Henderson, WM; Washington, JW Sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo en el medio ambiente. *Ciencia* 2022, 375(6580), n.º eabg9065.
- (9) ECHA Agencia Europea de Sustancias Químicas. *Gestión de sustancias PBT/mPmB bajo REACH-ECHA*. <https://echa.europa.eu/gestion-de-sustancias-pbt-vpnb> (consultado el 15 de junio de 2022).
- (10) Wang, Z.; Buser, AM; Primos, TI; Demattio, S.; Drost, W.; Johansson, O.; Ohno, K.; Patlewicz, G.; Ricardo, AM; Walker, GW; Blanco, SG; Leinala, E. Una nueva definición de la OCDE para sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo. *Reinar. ciencia Tecnología* 2021, 55(23), 15575-15578.
- (11) Primos, TI; DeWitt, JC; Glugé, J.; Goldenman, G.; Herzke, D.; Lohmann, R.; Miller, M.; Ng, CA; Scheringer, M.; Vierke, L.; Wang, Z. Estrategias para agrupar sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo (PFAS) para proteger la salud humana y ambiental. *Reinar. Sci.: Procesos Impactos* 2020, 22(7), 1444-1460.
- (12) Rockström, J.; Steffen, W.; Nadie, K.; persona, Å.; Chapín, F. S.; Lambin, EF; Lenton, TM; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, HJ; Nykvist, B.; de Wit, CA; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sorlin, S.; Snyder, PK; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, RW; Fabry, VJ; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, JA Un espacio operativo seguro para la humanidad. *Naturaleza* 2009, 461(7263), 472-475.
- (13) Rockström, J.; Steffen, W.; Nadie, K.; persona, Å.; Chapín, F. S.; Lambin, E.; Lenton, TM; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, HJ; Nykvist, B.; de Wit, CA; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sorlin, S.; Snyder, PK; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, RW; Fabry, VJ; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, J. Límites planetarios: Explorando el espacio operativo seguro para la humanidad. *Ecología y Sociedad* 2009, 14(2), 1.
- (14) Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, SE; Fetzer, I.; Bennett, EM; Biggs, R.; Carpintero, SR; de Vries, W.; de Wit, CA; Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; maza, GM; persona, LM; Ramanathan, V.; Reyers, B.; Sörlin, S. Límites planetarios: guía del desarrollo humano en un planeta cambiante. *Ciencia* 2015, 347(6223), 1259855.
- (15) Persona, LM; Breitholtz, M.; Primos, TI; de Wit, CA; MacLeod, M.; McLachlan, MS Enfrentando las amenazas desconocidas de los límites planetarios de la contaminación química. *Reinar. ciencia Tecnología* 2013, 47(22), 12619-12622.
- (16) Diamante, ML; de Wit, CA; Molander, S.; Scheringer, M.; Backhaus, T.; Lohmann, R.; Arvidson, R.; Bergman, A.; Hauschild, M.; Holoubek, I.; persona, L.; Suzuki, N.; Vighi, M.; Zetzsch, C. Explorando el límite planetario de la contaminación química. *Medio Ambiente Internacional* 2015, 78, 8-15.
- (17) Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. *Avisos de por vida sobre la salud en el agua potable para cuatro sustancias perfluoroalquiladas (PFAS)*. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-06/prepublication-fourpfas-june-2022.pdf> (consultado el 15 de junio de 2022).
- (18) Panel de la EFSA sobre Contaminantes en la Cadena Alimentaria (Panel CONTAM de la EFSA). Riesgo para la salud humana relacionado con la presencia de sustancias perfluoroalquiladas en los alimentos. *Diario de la EFSA* 2020, 18(9), n.º e06223.
- (19) Miljoministeriet. *Bekendtgørelse Om Vandkvalitet Og Tilsyn Med Vandforsyningsanlæg*, 2021; vol. BEK nr 2361 del 26/11/2021. <https://www.retsinformation.dk/eli/ta/2021/2361>.
- (20) Post, GB Pautas estatales y federales recientes de agua potable de EE. UU. para sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo. *Reinar. Toxicol. química* 2021, 40(3), 550-563.
- (21) Jayan, K.; Heru Husodo, A.; Astuti, I.; Sudarmadji, S.; Sugandawaty Djohan, T. El agua de lluvia como fuente de agua potable: impactos en la salud y tratamiento del agua de lluvia. *Revista de Salud Pública y Ambiental* 2019, 2019, e1760950.
- (22) Weiss, JM; van der Veen, I.; de Boer, J.; van Leeuwen, SPJ; Cofino, W.; Crum, S. Mejoras analíticas mostradas en cuatro estudios entre laboratorios de sustancias perfluoroalquiladas en muestras ambientales y alimentarias. *TrAC Tendencias en Química Analítica* 2013, 43, 204-216.
- (23) Chen, M.; Wang, C.; Gao, K.; Wang, X.; Fu, J.; Gong, P.; Wang, Y. Sustancias de perfluoroalquilo en la precipitación de la meseta tibetana durante la temporada del monzón: concentraciones, regiones de origen y flujos de masa. *quimiosfera* 2021, 282, 131105.
- (24) Lucio, KA; Edmiston, PL; Morrison, JJ; Faust, JA Análisis de correlación de sustancias perfluoroalquiladas en eventos de precipitación regionales de EE. UU. *Agua Res.* 2021, 190, 116685.
- (25) Liu, Z.; Lu, Y.; Shi, Y.; Wang, P.; Jones, K.; Sweetman, AJ; Johnson, CA; Zhang, M.; Zhou, Y.; Lu, X.; Su, C.; Sarvajayakesavaluc, S.; Khan, K. Bioacumulación de cultivos y humanos

Exposición de ácidos de perfluoroalquilo a través del transporte multimedia desde un mega parque industrial fluorquímico, China. *Reinar. En t.* 2017, 106, 37-47.

(26) Shan, G.; Chen, X.; Zhu, L. Ocurrencia, flujos y fuentes de sustancias de perfluoroalquilo con análisis de isómeros en la nieve del norte de China. *J. Peligro. Mate.* 2015, 299, 639-646.

(27) Johansson, JH; Shi, Y.; Salter, YO; Cousins, IT Variación espacial en la deposición atmosférica de ácidos perfluoroalquilados: elucidación de la fuente a través del análisis de patrones de isómeros. *Ciencias Ambientales: Procesos e Impactos* 2018, 20(7), 997-1006.

(28) Sammut, G.; Sinagra, E.; Helmus, R.; de Voogt, P. Sustancias perfluoroalquiladas en el medio ambiente maltés – (I) Agua superficial y agua de lluvia. *Ciencia del Medio Ambiente Total* 2017, 589, 182-190.

(29) Chen, H.; Zhang, L.; Li, M.; Yao, Y.; Zhao, Z.; Muñoz, G.; Sol, H. Sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo (PFAS) en la precipitación de China continental: contribuciones de precursores desconocidos y ácidos perfluoroalquilcarboxílicos de cadena corta (C2C3). *Agua Res.* 2019, 153, 169-177.

(30) Wang, S.; Lin, X.; Li, Q.; Li, Y.; Yamazaki, E.; Yamashita, N.; Wang, X. Distribución del tamaño de partículas, deposición húmeda y efecto de barrido de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) en la atmósfera de una ciudad subtropical de China. *Ciencia del Medio Ambiente Total* 2022, 823, 153528.

(31) Gewurtz, SB; Bradley, LE; Backus, S.; Paloma, A.; McGoldrick, D.; Hung, H.; Dryfhout-Clark, H. Los ácidos perfluoroalquilo en la precipitación y el agua superficial de los Grandes Lagos (2006-2018) indican la respuesta a las eliminaciones, la acción reguladora y la variabilidad en el destino y los procesos de transporte. *Reinar. ciencia Tecnología* 2019, 53(15), 8543-8552.

(32) Filipovic, M.; Laudon, H.; McLachlan, MS; Berger, U. Balance de masa de ácidos alquílicos perfluorados en una captación boreal prístina. *Reinar. ciencia Tecnología* 2015, 49(20), 12127-12135.

(33) Casas, G.; Martínez-Varela, A.; Vila-Costa, M.; Jiménez, B.; Dachs, J. Amplificación por lluvia de contaminantes orgánicos persistentes. *Reinar. ciencia Tecnología* 2021, 55(19), 12961-12972.

(34) Han, T.; Gao, L.; Chen, J.; él, X.; Wang, B. Variaciones espaciotemporales, fuentes y evaluación de riesgos para la salud de las sustancias perfluoroalquiladas en una bahía templada adyacente a Metropolis, norte de China. *Reinar. contaminar* 2020, 265, 115011.

(35) Lindfeldt, E.; Gyllenhammar, I.; Strandh, S.; Halldin Ankarberg, ML. Kartlaggning av per- och polyfluorerade alquilsustanciador PFAS, L-2021 n° 21; Livsmedelsverket: Upsala, 2021; pág. 38. <https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/publikationsdatabas/rapporter/2021/l-2021-nr-21-kart-laggning-av-per-och-polyfluorerademetilsubstanser.pdf>.

(36) Andrews, DQ; Naidenko, OV Exposición de toda la población a sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo del agua potable en los Estados Unidos. *Reinar. ciencia Tecnología Letón.* 2020, 7(12), 931-936.

(37) Livsmedelsverket. Riskhantering PFAS i dricksvatten och egenfångad fisk. <https://www.livsmedelsverket.se/foretagande-reglerkontroll/regler-for-livsmedelsforetag/dricksvattenproduktion/riskhantering-pfas-i-dricksvatten-egenfangad-fisk> (consultado el 12-04-2022).

(38) Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA). Sulfonato de perfluoroctano (PFOS), ácido perfluoroctanoico (PFOA) y sus sales Opinión científica del Panel sobre contaminantes en la cadena alimentaria. *Diario de la EFSA* 2008, 8(7), 653.

(39) Skaggs, CS; Logue, BA Análisis de ultratrazas de sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo en agua potable usando concentración de hielo vinculada con agitador extractivo y cromatografía líquida de alto rendimiento: espectrometría de masas en tándem. *Revista de cromatografía A* 2021, 1659, 462493.

(40) Eurofins. Pruebas de PFOS, PFOA y GenX. https://cdnmedia.eurofins.com/european-west/media/1926921/pfas_flier_oct_18_uk.pdf (consultado el 16 de junio de 2022).

(41) Yamashita, N.; Taniyasu, S.; Petrick, G.; Wei, S.; Gamo, T.; Lam, PKS; Kannan, K. Ácidos perfluorados como nueva sustancia química

Trazadores de la Circulación Global de las Aguas Oceánicas. *quimiosfera* 2008, 70(7), 1247-1255.

(42) Moermond, CTA; Verbruggen, EMJ; Smit, CE Límites de riesgo ambiental para PFOS, Informe RIVM 601714013/2010; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2010; pág. 70. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/601714013.pdf>.

(43) Ahrens, L. Compuestos de polifluoroalquilo en el medio ambiente acuático: una revisión de su ocurrencia y destino. *J. Medio Ambiente. monitorear* 2011, 13(1), 20-31.

(44) McLachlan, MS; Holmström, KE; Reth, M.; Berger, U. Descarga fluvial de carboxilatos perfluorados del continente europeo. *Reinar. ciencia Tecnología* 2007, 41(21), 7260-7265.

(45) Ciudad de Estocolmo. *Avrådan från att åta insjöfisk*. <https://via.tt.se/pressmeddelande/avradan-fran-att-ata-insjofisk?publisherId=1213538&releaseId=3302276> (consultado el 15 de junio de 2022).

(46) RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. *Risicogrenzen voor PFOS, PFOA y GenX voor toepassen van grond en bagger*. <https://www.rivm.nl/documenten/risicogrenzen-voor-pfos-pfoa-en-genx-voor-toepassen-van-grond-en-bagger> (consultado el 23-02-2022).

(47) RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. *Valores de fondo temporales para PFAS en suelo holandés*. <https://www.rivm.nl/en/news/valores-de-fondo-temporales-para-pfas-en-suelo-holandés> (consultado el 23-02-2022).

(48) RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. *Tijdelijke landelijke achtergrondwaarden bodem voor PFOS en PFOA*. <https://www.rivm.nl/documenten/tijdelijke-landelijke-achtergrondwaardenbodem-voor-pfos-en-pfoa> (consultado el 23-02-2022).

(49) Rankin, K.; Mabury, SA; Jenkins, TM; Washington, JW Una encuesta mundial y de América del Norte sobre sustancias perfluoroalquiladas en suelos superficiales: patrones de distribución y modo de ocurrencia. *quimiosfera* 2016, 161, 333-341.

(50) Sorengård, M.; Kikuchi, J.; Wiberg, K.; Ahrens, L. Distribución espacial y carga de sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo (PFAS) en suelos de fondo en Suecia. *quimiosfera* 2022, 295, 133944.

(51) Legislatura del Estado de Maine. *Una ley para prevenir la contaminación adicional de los suelos y las aguas del estado con los llamados productos químicos para siempre*. <https://legislature.maine.gov/legis/bills/getPDF.asp?paper=HP1417&item=2&num=130>.

(52) Prevedouros, K.; Primos, TI; dólar, RC; Korzeniowski, S. H. Fuentes, Destino y Transporte de Perfluorocarboxilatos. *Reinar. ciencia Tecnología* 2006, 40(1), 32-44.

(53) Sha, B.; Johansson, JH; Tunved, P.; Bohlin-Nizzetto, P.; Primos, TI; Salter, ME Sea Spray Aerosol (SSA) como fuente de ácidos de perfluoroalquilo (PFAA) para la atmósfera: evidencia de campo del monitoreo del aire a largo plazo. *Reinar. ciencia Tecnología* 2022, 56(1), 228-238.

(54) Tierra, M.; de Wit, CA; Bignert, A.; Primos, TI; Herzke, D.; Johansson, JH; Martin, JW ¿Cuál es el efecto de la eliminación gradual de las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas de cadena larga en las concentraciones de ácidos perfluoroalquilados y sus precursores en el medio ambiente? Una revisión sistemática. *Evidencia Ambiental* 2018, 7(1), 4.

(55) MacLeod, M.; Breitholtz, M.; Primos, TI; Wit, CA de; persona, LM; Rudén, C.; McLachlan, MS Identificación de sustancias químicas que son amenazas a los límites planetarios. *Reinar. ciencia Tecnología* 2014, 48(19), 11057-11063.

(56) Boucher, JM; Primos, TI; Scheringer, M.; cazador de hambre, K.; Wang, Z. Hacia un inventario global completo de emisiones de ácidos perfluoroalcanosulfónicos (PFSA) C4-C10 y precursores relacionados: enfoque en el ciclo de vida de los productos basados en C6 y C10. *Reinar. ciencia Tecnología Letón.* 2019, 8(1), 1-7.

(57) Grandjean, P.; Heilmann, C.; Weihe, P.; Nielsen, F.; Mogensen, UB; Timmermann, A.; Budtz-Jørgensen, E. Las exposiciones estimadas a los compuestos perfluorados en la infancia predicen las concentraciones atenuadas de anticuerpos de vacunas a los 5 años de edad. *Revista de inmunotoxicología* 2017, 14(1), 188-195.

(58) Consejo Interestatal de Tecnología y Regulación (ITRC). *PFAS: Sustancias de perfluoroalquilo y polifluoroalquilo*. https://pfas-1.itrcweb.org/#1_7 (consultado el 15 de junio de 2022).

(59) Goldenman, G.; Fernández, M.; Holanda, M.; Tugran, T.; Nordín, A.; Schoumacher, C.; McNeill, A. *Costo de la inacción: un análisis socioeconómico de los impactos ambientales y de salud relacionados con la exposición a PFAS*; Nordisk Ministerrad, 2019. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:norden:org:diva-5514>.

(60) Blum, A.; Balán, SA; Scheringer, M.; Tréveris, X.; hombre de oro, GRAMO.; Primos, TI; Diamante, M.; Fletcher, T.; Higgins, C.; lindeman, AE; Peaslee, G.; de Voogt, P.; Wang, Z.; Weber, R. La Declaración de Madrid sobre Sustancias de Poli- y Perfluoroalquilo (PFAS). *Reinar. Perspectiva de Salud*. 2015, 123(5), A107-A111.

(61) Primos, TI; Goldenman, G.; Herzke, D.; Lohmann, R.; Miller, M.; Ng, CA; Patton, S.; Scheringer, M.; Tréveris, X.; Vierke, L.; Wang, Z.; DeWitt, JC El concepto de uso esencial para determinar cuándo se pueden eliminar los usos de las PFAS. *Reinar. Sci.: Procesos Impactos* 2019, 21(11), 1803-1815.

Recomendado por ACS

Volatilidad y propiedades de interacción no específicas de van der Waals de Per-y sustancias polifluoroalquiladas (PFAS): Evaluación con hexadecano/Coeficientes de partición de aire

jort martillo y satoshi endo

14 DE OCTUBRE DE 2022

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL

LEER 

Por-y sustancias polifluoroalquiladas en los uniformes escolares norteamericanos

Chunjie Xia, Marta Venier, *et al.*

21 DE SEPTIEMBRE DE 2022

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL

LEER 

Contaminantes emergentes: Alternativas fluoradas a los PFAS existentes

Ting Ruan, Guibin Jiang, *et al.*

17 DE MAYO DE 2022

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL

LEER 

pinturas: Una fuente de PFAS volátil en el aire—Implicaciones potenciales para la exposición por inhalación

Liliana Cahuas, Jennifer A. Field, *et al.*

11 DE NOVIEMBRE DE 2022

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL

LEER 

Obtén más sugerencias >