

Fuera del Espacio Operativo Seguro del Límite Planetario para Entidades Noveles

Linn Persson, Bethanie M. Carney Almroth, Christopher D. Collins, Sarah Cornell, Cynthia A. de Wit, Miriam L. Diamond, Peter Fantke, Martin Hassellöv, Matthew MacLeod, Morten W. Ryberg, Peter Søggaard Jørgensen, Patricia Villarrubia-Gómez, Zhanyun Wang, and Michael Zwicky Hauschild

Síntesis

Sostenemos que se ha superado el espacio operativo seguro del límite planetario de nuevas entidades, ya que la producción y las emisiones anuales están aumentando a un ritmo que supera la capacidad global de evaluación y seguimiento. El límite de las entidades nuevas en el

El límite de las entidades nuevas en el marco de los límites planetarios se refiere a entidades que son nuevas en un sentido geológico y que podrían tener impactos a gran escala que amenacen la integridad de los procesos del sistema Tierra.

Revisamos la literatura científica relevante para cuantificar el límite de las nuevas entidades y destacamos la contaminación por plásticos como un aspecto particular de gran consternación.

como un aspecto particular de gran consternación. Se presenta una vía de impacto desde la producción de nuevas entidades hasta los impactos en los procesos del sistema Tierra. Definimos y aplicamos tres criterios para evaluar la idoneidad de las variables de control del límite: factibilidad, relevancia y exhaustividad. Proponemos varias variables de control complementarias para captar la complejidad de este límite, al tiempo que reconocemos las principales limitaciones de los datos. Llegamos a la conclusión de que la humanidad opera actualmente fuera del límite planetario



Foto de [las Min](#) en [Unsplash](#)

marco de los límites planetarios se refiere a entidades que son nuevas en un sentido geológico y que podrían tener impactos a gran escala que amenacen la integridad de los procesos del sistema Tierra. Revisamos la literatura científica relevante para cuantificar el límite de las nuevas entidades y destacamos la contaminación por plásticos

basándonos en el peso de la evidencia para varias de estas variables de control. El ritmo creciente de producción y liberación de grandes volúmenes y mayor número de nuevas entidades con diversos potenciales de riesgo supera la capacidad de las sociedades para llevar a cabo evaluaciones y controles relacionados con la seguridad. Recomendamos tomar medidas urgentes para reducir el daño asociado a la superación del límite mediante la reducción de la producción y liberación de nuevas entidades, teniendo en cuenta que, aun así, la persistencia de muchas nuevas entidades y/o sus efectos asociados seguirán suponiendo una amenaza.

Sinopsis

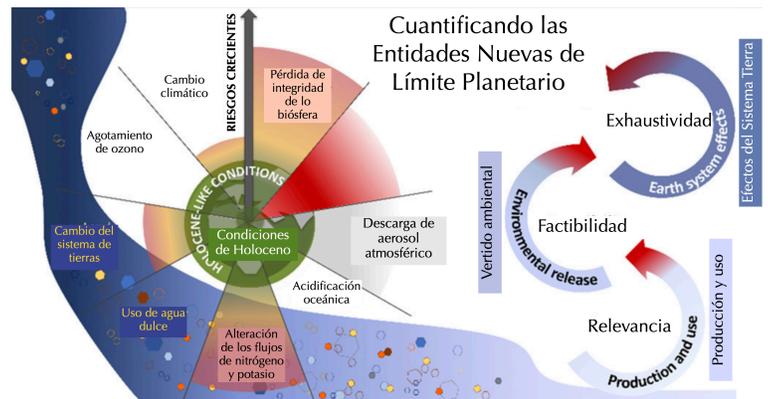
El aumento de la producción y las emisiones de Nuevas Entidades supera las capacidades de evaluación y seguimiento, lo que provoca la transgresión de su límite planetario.

Introducción

Dado que la contaminación química tiene el potencial de causar graves problemas a los ecosistemas y a la salud humana a diferentes escalas, (1) pero también de alterar procesos vitales del sistema Tierra de los que depende la vida humana.

La "contaminación química" se incluyó como uno de los nueve límites planetarios, (2) en respuesta a esta comprensión. Steffen et al. (3) cambiaron el nombre del límite de la "contaminación química" por el de "entidades noveles" (ENs), definidas como "sustancias nuevas, formas nuevas de sustancias existentes y formas de vida modificadas", incluidas "sustancias químicas y otros tipos nuevos de materiales u organismos artificiales no conocidos previamente en el sistema Tierra, así como elementos naturales (por ejemplo, metales pesados) movilizados por actividades antropogénicas". Steffen et al. (3) argumentaron que la introducción antropogénica de entidades nuevas en el medio ambiente es motivo de consternación a nivel mundial cuando estas entidades muestran persistencia, movilidad a través de escalas con la consiguiente distribución generalizada y acumulación en los organismos y el medio ambiente, y posibles impactos negativos en los procesos o subsistemas vitales del Sistema Tierra.

Hasta ahora no se ha definido ningún límite cuantitativo para el límite de las entidades nuevas, aunque algunas sustancias químicas concretas se cuantifican en otros límites planetarios, como los gases de efecto invernadero y los CFC. Se han especificado las condiciones en las que las sustancias químicas pueden suponer una amenaza planetaria (4,5) y se han estudiado las formas en las que los efectos sistémicos en cascada llegan a representar un problema a escala planetaria, por ejemplo, en el caso de los plásticos (6) (mezclas de sustancias químicas no poliméricas y poliméricas). Los elevados costes para la sociedad asociados al uso actual y a las emisiones al medio ambiente de nuevas entidades (1,7-11) ofrecen argumentos adicionales de peso para emprender una acción rápida que aborde este complejo límite planetario. La investigación y evaluación de este límite puede llamar la atención sobre los riesgos globales para los seres humanos y la biota, e impulsar acciones para mitigarlos. Como parte del marco de los límites planetarios, un límite cuantificado también puede ofrecer una base científica (por ejemplo, objetivos e indicadores para el desarrollo de acciones y la evaluación de la eficacia) en los procesos políticos, como el Enfoque Estratégico de las Naciones Unidas para la Gestión de Productos Químicos a Nivel Internacional y su sucesor. (12)



Este artículo revisa la evolución del debate científico relacionado con el límite planetario para nuevas entidades (EN-LP) desde 2009 y analiza las opciones para su cuantificación.

Llegamos a la conclusión de que las crecientes tendencias de producción y emisiones de diversas entidades nuevas, que superan nuestros esfuerzos de evaluación y control de la seguridad, constituyen una transgresión del límite planetario y que es necesario tomar medidas inmediatas para volver al espacio operativo seguro.

Nos centramos en la contaminación química, destacando la contaminación por plásticos como un subconjunto particular de gran consternación, y proporcionamos una evaluación del estado actual de este límite planetario. Se ha determinado que las sustancias químicas en general, incluidos los plásticos, reúnen las características de una nueva entidad.

(13,14) Aunque ambos son similares en muchos aspectos, las diferencias entre los plásticos y otros productos químicos nos brindan la oportunidad de explorar una amplia gama de impactos a la hora de definir nuevas variables de control para este límite planetario. Llegamos a la conclusión de que las crecientes tendencias de producción y emisiones de diversas entidades nuevas, que superan nuestros esfuerzos de evaluación y control de la seguridad, constituyen una transgresión del límite planetario y que es necesario tomar medidas inmediatas para volver al espacio operativo seguro.

Para el análisis, seguimos la definición de ENs sugerida por Steffen et al. (3) Novel significa nuevo en el sentido geológico, es decir, creado, introducido o reciclado por los seres humanos. Se trata de sustancias químicas fabricadas de forma intencionada y no intencionada, materiales artificiales y sus productos de transformación, que tienen el potencial de causar efectos en los procesos vitales del sistema Tierra (15), así como elementos y materiales naturales movilizados de nuevas maneras, nuevas formas o a tasas sustancialmente mayores por las actividades antropogénicas. Por procesos del Sistema Tierra entendemos los procesos biofísicos que, en conjunto, determinan la capacidad de autorregulación del planeta (2), es decir, los procesos físicos, químicos y biológicos que interactúan en la tierra, los océanos y la atmósfera. Esta perspectiva macro garantiza que el EN-LP esté conceptualmente alineado con los demás límites planetarios, y proporciona un complemento necesario a las actuales preocupaciones sociales subglobales que enmarcan la salud ecológica y humana como los puntos finales directos de la contaminación química.

El Límite Planetario para Entidades Noveles

Varios estudios han abordado el tema de un límite planetario para la contaminación química y las nuevas entidades. Una de las líneas de debate se ha centrado en qué tipo de sustancias químicas deben tenerse en cuenta, en función de su comportamiento sistémico. Sala y Saouter (16) propusieron que se diera prioridad a las sustancias químicas sintéticas que se degradan lentamente y se acumulan en el medio ambiente. Diamond et al. (4) argumentaron que la

Tras varias décadas de producción masiva, los plásticos son ahora omnipresentes en todo el planeta.

contaminación química, en conjunto, supone una amenaza para la integridad del ecosistema mundial y advirtieron del peligro de retrasar las medidas para reducir la presión contaminante mientras se intenta aumentar la certidumbre científica. Como primer paso, recomendaron tener en

cuenta sustancias químicas bien conocidas, como los contaminantes orgánicos persistentes (COP) y las sustancias químicas persistentes, bioacumulativas y tóxicas (PBT). Bernhardt et al. demostraron que la elevada tasa de cambio en la producción y variedad de sustancias químicas sintéticas en las últimas cuatro décadas supera a muchos otros factores de cambio. (17) Perlinger et al. (18) propusieron que "la medición y la modelización del destino y el transporte de compuestos nocivos que se diseminan globalmente a través de ciclos repetidos de intercambio atmósfera-superficie deberían incorporarse a los esfuerzos por identificar límites seguros e integrar esos límites en los sistemas de gobernanza".

Entre las entidades noveles, la contaminación por plásticos se ha elevado a la categoría de problema potencial de gran consternación en los EN-LP. (6,14,19) Tras varias décadas de producción masiva, los plásticos son ahora omnipresentes en todo el planeta. (20,21) Todo el ciclo de producción de plásticos conlleva impactos climáticos, (22-24) y los plásticos también pueden afectar a la biodiversidad a través de impactos físicos, por ejemplo, a través de enredos o ingestión, (25) sumándose a otras grandes presiones sobre la biodiversidad. (26) Así pues, la comprensión de lo que es nocivo o peligroso desde una perspectiva planetaria se ha ampliado para incluir efectos que van más allá de la toxicidad como el principal objetivo actual de la gestión de los productos químicos.

Otra línea de debate se centra en los efectos aguas abajo. Por ejemplo, la evaluación de la huella química pretende evaluar la capacidad de carga de los ecosistemas receptores para definir EN-LP en términos de entradas químicas totales que pueden absorberse sin impactos negativos inaceptables. (16,27-29) Incluso sin cuantificación de los límites, el concepto de amenazas para los límites planetarios se ha utilizado para definir perfiles químicos con el fin de detectar sustancias químicas con perfiles de exposición ambiental no deseados. (30)

Un aspecto especialmente desafiante para la cuantificación de EN-LP es el potencial de nuevas entidades conocidas y desconocidas para causar efectos hasta ahora desconocidos. (5,13) La vigilancia del medio ambiente se centra en nuevas entidades conocidas, lo que limita la búsqueda de "desconocidos". (31)

Una Vía de Impacto y Criterios para una Variable de Control

El fundamento científico del concepto de límite planetario es que la estabilidad climática de la Tierra y la capacidad de recuperación de los ecosistemas, observadas a lo largo de ~10 000 años del Holoceno, son el resultado de interacciones biofísicas dinámicas que ahora pueden verse alteradas radicalmente por las actividades humanas. Cuanto más alejen las actividades humanas a la Tierra de las condiciones similares a las del Holoceno, mayores serán los riesgos de cambios irreversibles y a gran escala, porque los umbrales en los procesos del sistema Tierra son características intrínsecas del sistema Tierra. (32,33) El marco de los límites planetarios identifica "variables de control", como la concentración de CO₂, la tasa de fijación de nitrógeno y la saturación de aragonito del agua de mar, que rastrean tanto el comportamiento del sistema Tierra (es decir, la temperatura de la Tierra, la limitación de nutrientes y los sumideros de carbono de los océanos, respectivamente) como la perturbación que puede provocar el cruce de umbrales, que están vinculados a una o varias variables de control. Una variable de control se define como un parámetro medible relacionado causalmente con un límite específico. Las posiciones de los límites planetarios se fijan en el extremo inferior de la zona de incertidumbre científica de condiciones "seguras" similares a las del Holoceno. (2)

En el caso de entidades nuevas introducidas exclusivamente por el ser humano (por ejemplo, productos químicos orgánicos xenobióticos, plásticos), por definición no existe una "variabilidad natural" con respecto a la cual una variable de control pueda seguir el cambio en escalas temporales humanas, ni existe un precedente biofísico para identificar umbrales. Otra complicación es que la EN-LP tiene una amplia gama de posibles puntos finales (incluida la afectación de otros procesos de los LP). Pueden distinguirse distintas categorías de impactos de la NE: (4) efectos biológicos directos, como la disminución de los depredadores superiores tras el uso generalizado del DDT, con los consiguientes efectos ecológicos en cascada; vías físicas, como la reducción del albedo por las partículas de carbono negro que afectan al clima; y reacciones químicas que no pueden controlarse tras la liberación, como la descomposición del ozono por los CFC en las nubes estratosféricas polares.

Definir las variables de control es fundamental para hacer operativo un límite planetario y evaluar la posición del sistema Tierra con respecto a los umbrales o puntos de inflexión. Las variables de control para el EN-LP deben basarse en una comprensión científica de los mecanismos causales que vinculan la introducción de EN con la perturbación de los efectos del sistema Tierra, tal como se presenta en la vía de impacto de la figura 1. La complejidad y diversidad de los mecanismos de impacto hacen que ninguna variable de control pueda abarcar por sí sola todo el espacio operativo seguro de las EN, por lo que la cuantificación en términos de tendencias (presiones) en lugar de condiciones del sistema puede ser más adecuada para adoptar un enfoque preventivo.

El enfoque de la vía de impacto abre un abanico muy amplio de posibilidades, por lo que definimos los siguientes criterios para fundamentar la selección de opciones de variables de control:

Factibilidad (F): ¿Puede medirse? La disponibilidad de datos debe permitir la cuantificación a escalas espaciales y temporales pertinentes y la comparación con otros datos de seguimiento biofísico.

Relevancia (R): ¿Puede vincularse sólidamente a los efectos? Debe ser posible vincular de forma consistente la variable de control a uno o más efectos que se sepa que influyen en el funcionamiento del Sistema Tierra, es decir, establecer un vínculo causa-efecto.

Exhaustividad (E): ¿Capta la escala planetaria del problema? La variable de control debe indicar la totalidad de los impactos potenciales de las entidades novedosas, a través de umbrales de causa-efecto que afecten a un determinado proceso del sistema Tierra o a través de efectos sobre uno o más de los otros LPs.

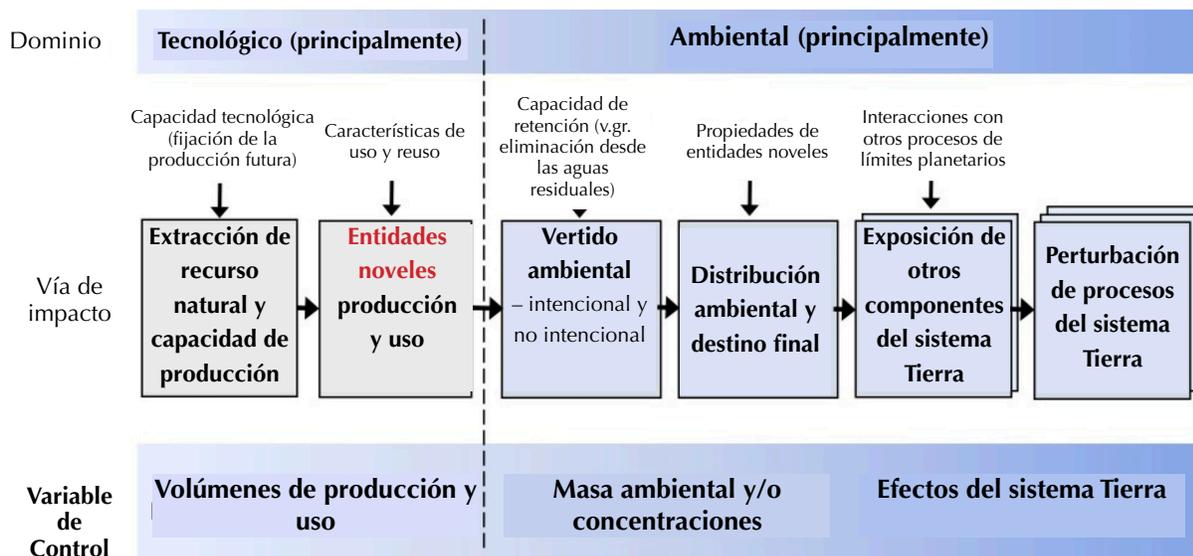


Figura 1. Vía de impacto generalizada para nuevas entidades que conecta la capacidad de producción, la liberación en el medio ambiente, el destino y la distribución con la perturbación de los procesos del sistema Tierra.

La facilidad de cuantificación ("factibilidad") suele ser mayor al principio de la vía de impacto (a la izquierda en la figura 1). En el caso de una variable de control definida en función de la exposición o perturbación (a la derecha de la figura 1), se dispone de conocimientos sólidos sobre los efectos ("relevancia") de un número limitado de entidades noveles,

pero la incertidumbre aumenta porque hay que hacer suposiciones y parametrizaciones para cuantificar cada paso de la vía. La exhaustividad es mayor al principio de la vía de impacto, ya que el número de destinos y efectos posibles aumenta de izquierda a derecha, mientras que la capacidad de las políticas y acciones actuales para ejercer control sobre los impactos disminuye de izquierda a derecha a lo largo de la vía.

Variables de Control para el Límite Planetario de Entidades Noveles

A continuación evaluamos opciones de variables de control guiadas por nuestros criterios, procediendo de izquierda a derecha a lo largo de la vía de impacto EN-LP (figura 1).

Producción de Entidades Noveles

La producción de entidades noveles está aumentando rápidamente. La industria química es la segunda industria manufacturera mundial. (1) La producción mundial se ha multiplicado por 50 desde 1950 y se prevé que vuelva a triplicarse en 2050 en comparación con 2010. (34) La extracción de materiales como materias primas para entidades noveles fue de aproximadamente 92.000 millones de toneladas en todo el mundo en 2017, y se prevé que alcance los 190.000 millones de toneladas en 2060. (1) Se calcula que existen 350 000 sustancias químicas (o mezclas de sustancias químicas) en el mercado mundial. (35) Casi 70 000 se han registrado en la última década; muchas sustancias químicas (casi 30 000) solo se han registrado en economías emergentes, donde la producción de sustancias químicas ha aumentado rápidamente, pero la capacidad de gestión y eliminación de sustancias químicas suele ser limitada. La producción de sustancias químicas previstas conlleva la producción no prevista de subproductos, productos de transformación e impurezas que pueden no tenerse en cuenta en las evaluaciones y medidas de gestión de sustancias químicas.

Aquí, consideramos las variables de control tendencia en los volúmenes de producción de sustancias químicas, tendencia en los volúmenes de producción de plásticos y la proporción de sustancias químicas en el mercado que se evalúan por su riesgo o seguridad (Tabla 1).

La tendencia en el volumen de producción de sustancias químicas se aproxima a la carga química agregada sobre el sistema Tierra. Esta métrica podría ser una variable de control factible porque los productores conocen los datos de producción y suelen reportarlos a los organismos reguladores para un gran número de sustancias químicas. (1,36) Sin embargo, los datos completos no suelen estar a disposición del público, lo que ha llevado a productores, organizaciones comerciales y gobiernos a solicitar su publicación. (36) Las sustancias químicas podrían clasificarse por instalaciones de producción, materias primas o compuestos de origen, o por categorías específicas como rasgos estructurales o usos, ya que es probable que sea más factible obtener datos muy agregados. La Figura 2 muestra la tendencia de la capacidad de producción mundial de una serie de grupos de entidades novedosas, todas ellas con elevadas tasas de crecimiento en las dos últimas décadas. Se eligieron como sustancias químicas representativas de las que se disponía públicamente de datos de producción/capacidad de producción. Los datos están normalizados debido a las diferentes escalas de unidades utilizadas al reportar. Los gráficos individuales de cada nueva entidad figuran en la Información complementaria (IC).

Tabla 1. NE-PB y posibles variables de control

Categoría de variables de control	Ejemplos específicos	Evaluación de los criterios de las variables de control ^a		Estado actual	Comentarios respecto al límite
		Alto	Bajo		
Tendencia en producción de entidades noveles	Volumen de producción de químicos	F	R	La producción mundial se ha multiplicado por 50 desde 1950, y volverá a triplicarse en 2050 en comparación con 2010. (34) Se prevé que continúe el crecimiento de la producción; por ejemplo, se espera que las ventas se dupliquen entre 2017 y 2030 (43).	No se ha demostrado que el crecimiento actual de la producción esté dentro del espacio de operación segura. Desafío de control debido al confinamiento.
		E			
	Volumen de producción de plásticos	F	R	La producción mundial aumentó un 79% de 2000 a 2015. (37) Se prevé que la producción mundial acumulada se triplique de aquí a 2050 (44,45).	No se ha demostrado que el crecimiento actual de la producción esté dentro del espacio de operación segura. Desafío de control debido al confinamiento.
Porcentaje de sustancias químicas disponibles en el mercado que disponen de datos de seguridad o de una evaluación regulatoria		R	F	Sólo se ha evaluado el riesgo o la seguridad de una parte de las sustancias químicas que se utilizan actualmente.	Cuanto mayor sea el número de sustancias comercializadas cuya seguridad o riesgo no se hayan evaluado, mayor será el riesgo de amenazas de EN-LP.
			E		
Tendencia en la emisión de entidades noveles	Cantidades de emisión de sustancias químicas peligrosas	R	F	Se dispone de datos primarios sobre emisiones de muy pocas ENs en muy pocos países. La tendencia es al aumento de las emisiones a pesar de la mejora de los controles de emisiones para un número limitado de sustancias.	No se ha demostrado que el crecimiento actual de las emisiones se sitúe dentro del espacio de operaciones seguras.
			E		
Cantidades de emisión de plásticos al medio ambiente		R	F	Aumento del 3,8% en los volúmenes de liberación entre 2014 y 2015 (37,46)	El límite está siendo transgredido por el actual aumento de los volúmenes de emisión.
			E		
Impacto no deseado de entidades noveles en los procesos del sistema Tierra	toxicidad de la contaminación química	R	F	Metolacoloro (plaguicida) y bisfenol A para el compartimento de agua dulce en Europa; estas dos sustancias ocupan por sí solas alrededor de la 1000ª parte del espacio operativo seguro de contaminación química.	El límite puede definirse en relación con la huella química.
			E		
	Alteración de la integridad de la biosfera por contaminación plástica	R	F	Amplias evidencias de efectos físicos y toxicológicos, incluidos los efectos sobre la distribución de las especies y las sensibilidades.	Un umbral basado en la toxicidad se fijaría en PEC/PNEC = 1, con superaciones de EN-LP ya evidentes en varias regiones.
			E		

a: F, factibilidad; R, relevancia; E, exhaustividad.

La tendencia de la producción química total capta los posibles impactos planetarios a un alto nivel de agregación, lo que la hace exhaustiva. Una razón de peso para considerar la producción total de sustancias químicas como variable de control es que pone al descubierto el enojoso problema del lado de la oferta que supone el efecto "bloqueo", en el que la inercia económica, técnica, política y burocrática mantiene la producción a pesar de los imperativos de reducción. (39,40) El mantenimiento de la producción puede provocar un cambio entre sustancias químicas con diferentes tipos de funcionalidad. Por ejemplo, en EUA, el 77% del bromo se utilizaba para producir gasolina con plomo en los años sesenta. Con la eliminación progresiva de la gasolina con plomo, el bromo se utilizó cada vez más para producir retardantes de llama bromados, que pasaron a ser el uso principal. (41) Del mismo modo, la producción de plata ha pasado de un uso decreciente en la fotoimagen analógica a un mayor uso como biocida. Además, la mayor parte de la capacidad de producción se destina a múltiples sustancias químicas relacionadas y no a una única entidad. El efecto de bloqueo significa que una restricción en la producción y uso de un conjunto de sustancias químicas provoca un cambio en la producción de sustancias químicas estrechamente relacionadas (por ejemplo, los fluidos dieléctricos pasan de los PCB a las parafinas cloradas, la producción de policarbonato pasa del bisfenol A a otros bisfenoles), y no una reducción en la producción total de sustancias químicas. Dado que la potencia de los efectos de las sustancias químicas es muy diferente, el desplazamiento de la producción de una sustancia química a otra puede aumentar o disminuir los efectos relacionados en el sistema Tierra o provocar otros tipos de efectos (desplazamiento de la carga).

La tendencia de la producción total de sustancias químicas como variable de control puede, a primera vista, parecer poco relevante porque los vínculos entre la producción de sustancias químicas y las variables de efecto no son obvios y pueden ser tenues y difíciles de evaluar: se carece de conocimientos sobre el potencial de efectos adversos causados por el elevado número de sustancias químicas, con datos limitados sobre las mezclas químicas tal y como se encuentran en el medio ambiente, producidas de forma intencionada y no intencionada. (42) Se puede argumentar que el volumen de producción está directamente relacionado con la emisión inmediata de algunas sustancias químicas (por ejemplo, los pesticidas que se aplican intencionadamente; las sustancias químicas de los productos de cuidado personal que se eliminan por el desagüe), pero la emisión final es más difícil de cuantificar (por ejemplo, los CFC utilizados como agentes espumantes en el aislamiento de poliestireno se emiten al renovar los edificios; los tintes y otros aditivos plásticos se emiten a medida que los plásticos envejecen). Otro aspecto es que la producción química puede dar cuenta de una emisión global inevitable, ya que la producción se alimenta de cadenas de suministro globales muy complejas y

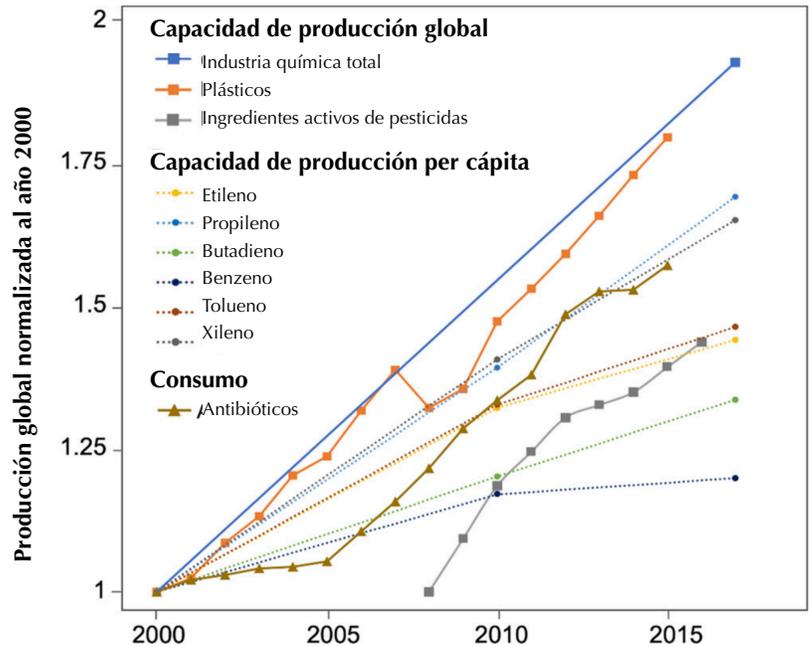


Figura 2. Tendencias mundiales actuales al alza de la producción de la industria química, expresadas como el crecimiento relativo en algunas entidades noveles entre 2000 y 2017 (para cuando se dispone de datos comparables): 1. 1. Capacidad de producción mundial de la industria química en su conjunto, producción de plásticos e ingredientes activos de pesticidas (los primeros datos son de 2008); 2. Capacidad de producción per cápita en peso de monómeros y disolventes clave: benceno, butadieno, etileno, propileno, tolueno y xileno; 3. Consumo mundial de antibióticos. Datos del Global Chemicals Outlook II, (1) Geyer et al. 2017, (37) y Søgaard Jørgensen et al. (38).

poco conocidas. Sin embargo, la suposición preventiva de una emisión inevitable al medio ambiente aumenta la importancia de la tendencia de la producción química como variable de control.

La tendencia en el volumen de producción de plásticos podría utilizarse como variable de control. El uso mundial de plásticos ha aumentado de forma constante desde la década de 1950, con un incremento de la producción mundial del 79% entre 2000 y 2015. (37) Se prevé que la producción mundial acumulada se triplique en 2050 y alcance los 33.000 millones de toneladas. (44,45) Se prevé que la producción de plástico y, en consecuencia, de residuos plásticos, crezca por encima de la eficacia de las estrategias de mitigación para luchar contra la contaminación por plástico a nivel mundial. (47) Los datos sobre la producción de plástico están disponibles en todo el mundo, lo que permite un seguimiento continuo de los volúmenes de producción; véase la Figura 2 para la reciente década de aumento. Por tanto, se trata de una variable de control factible.

La producción de plásticos está fuertemente asociada a los efectos de sujeción a las materias primas, en particular a los combustibles fósiles. El 4% de los combustibles fósiles se utiliza para la producción de materiales plásticos, (48) y casi el

Los plásticos están relacionados con los dos límites planetarios fundamentales del cambio climático y la integridad de la biosfera, lo que convierte el volumen de producción de plásticos en un indicador indirecto de los cambios provocados por el hombre y en una variable de control exhaustiva.

99% de las materias primas para materiales plásticos procede de combustibles fósiles. (49) Los plásticos son sólo un componente de un complejo entramado industrial que también utiliza materias primas basadas en combustibles fósiles para producir fertilizantes industriales, disolventes y otros productos químicos. (36) Así pues, los plásticos están relacionados con los dos límites planetarios fundamentales

del cambio climático y la integridad de la biosfera, (3) lo que convierte el volumen de producción de plásticos en un indicador indirecto de los cambios provocados por el hombre y en una variable de control exhaustiva. Sin embargo, se sitúa muy a la izquierda en la vía de impacto y no tiene en cuenta las interacciones y efectos medioambientales. Las pautas de consumo sostenible, la reutilización o el reciclado y la captura de residuos plásticos mal gestionados pueden contribuir a desvincular la cantidad de plástico producida de sus posibles impactos planetarios. (50) El volumen de producción, por tanto, tiene poca relevancia como indicador de alteración de la estabilidad del Holoceno. Sin embargo, es muy discutible que estas medidas de control, a escala global, puedan producirse a un ritmo proporcional al aumento de la producción. (7,47)

La proporción de sustancias químicas con datos de seguridad o evaluaciones reglamentarias es una opción para la variable de control EN-LP. Muchos países cuentan con legislación y sistemas de evaluación del peligro o riesgo de las nuevas sustancias químicas, aunque con una gran variabilidad en los requisitos y capacidades de evaluación entre países. Las sustancias químicas con datos de seguridad son aquellas sobre cuyas propiedades peligrosas se ha facilitado información a las autoridades reguladoras, los usuarios o el público. Las sustancias químicas con evaluaciones reglamentarias son aquellas cuyas propiedades peligrosas o riesgos han sido evaluados adicionalmente por los organismos reguladores.

La relevancia de esta variable de control para el EN-LP es mayor que la de los volúmenes de producción porque los efectos son más conocidos y posiblemente controlados. Muchos componentes de la evaluación (es decir, toxicidad, persistencia y potencial de transporte a gran distancia) tienen una relación directa con los efectos en el sistema Tierra. (13,51) No obstante, su relevancia se ve limitada por el hecho de que ningún requisito de datos de seguridad o esquema de evaluación reglamentaria puede incluir todos los posibles impactos de las sustancias químicas en los procesos del

sistema Tierra. (52) Su relevancia como variable de control operacional depende de la calidad de los datos de seguridad o de las evaluaciones reglamentarias disponibles. (53)

La viabilidad de esta variable de control es limitada. Muchos grandes productores y usuarios de sustancias químicas no están cubiertos por una legislación eficaz sobre gestión de sustancias químicas o exposición ocupacional y/o inventarios químicos. (35,52,54) Además, los marcos que regulan las sustancias químicas en el mercado muestran una gran variabilidad entre jurisdicciones, incluido el alcance de las evaluaciones reglamentarias, que van desde la comprobación del cumplimiento (por ejemplo, si se han rellenado todos los campos de datos requeridos), pasando por la comprobación de la plausibilidad de los datos de seguridad reportados, hasta las evaluaciones en profundidad del peligro y el riesgo de una sustancia química mediante la combinación de los datos de seguridad reportados y los de la bibliografía.

Tomando como ejemplo el REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Preparados Químicos) de la UE, en diciembre de 2020 se habían registrado ~23 000 sustancias químicas. (55) Entre ellas, más de 12 000 sustancias estaban registradas como sustancias no intermedias (las sustancias intermedias tienen requisitos de datos de seguridad reducidos) con una producción superior a 1 tonelada al año, de las cuales unas 2400 sustancias han sido,

Un aspecto clave de las evaluaciones de seguridad de las sustancias químicas y de otras EN es el tratamiento de las amenazas desconocidas de EN-LP. Los riesgos asociados a la emisión de nuevas entidades desde la tecnósfera a distintos compartimentos medioambientales están relacionados con los posibles efectos en toda la gama de límites planetarios.

o están siendo, evaluadas y tratadas (403 con gestión reglamentaria de riesgos en curso, 786 sin que se hayan propuesto actualmente nuevas medidas, y 1181 con gestión reglamentaria de riesgos en estudio). Así pues, incluso en este pequeño subconjunto del universo químico, quedan por evaluar unas 10 000 sustancias (el 80%) después de más de 10 años de funcionamiento de REACH. Una variable de control basada en datos de

seguridad o en evaluaciones reglamentarias no se presta fácilmente al establecimiento de un límite cuantitativo global porque no se traduce en un análisis de los impactos globales de las sustancias químicas inseguras.

Un aspecto clave de las evaluaciones de seguridad de las sustancias químicas y de otras EN es el tratamiento de las amenazas desconocidas de EN-LP. Los riesgos asociados a la emisión de nuevas entidades desde la tecnósfera a distintos compartimentos medioambientales están relacionados con los posibles efectos en toda la gama de límites planetarios. Por ejemplo, las nuevas entidades podrían sorprendernos, por ejemplo, con efectos en la química oceánica que afecten a la formación de aerosoles marinos, (56,57) un componente importante del sistema climático, (58) o con efectos de bacterias resistentes a los antibióticos con propagación global. (59) Una adición de EN-LP a las evaluaciones de riesgos y peligros podría captar sustancias químicas que no se destacarían en los esquemas de evaluación actuales. El método de detección de amenazas para los límites planetarios propuesto por MacLeod et al. (13) ya se ha puesto a prueba con un conjunto de sustancias químicas actualmente no reguladas que se encuentran en el medio ambiente del Ártico (30), lo que demuestra que algunas sustancias químicas de preocupación emergente no se ajustaban a los perfiles bien establecidos para los contaminantes orgánicos persistentes (COP) o las sustancias químicas muy persistentes/muy acumulativas, pero calificaban alto en los perfiles de posibles amenazas para los límites planetarios.

Tendencia de Liberación de Entidades Noveles

Avanzando más hacia la derecha en la vía de impacto, las tendencias de emisión o liberación de EN al medio ambiente podrían ser una variable de control. Cada año se liberan millones de toneladas de EN al medio ambiente, incluidas emisiones a la atmósfera, vertidos al agua y emisiones de residuos sólidos y peligrosos, (1) a lo largo de cadenas

completas de suministro de productos y servicios. Las EN se encuentran cada vez más en los lugares más remotos del planeta, por ejemplo, ésteres organofosforados en el océano Ártico, (60) y partículas microplásticas en las profundidades oceánicas (61) y en las altas montañas. (62) Esta variable de control puede dirigirse a distintos grupos de EN. Aquí analizamos dos opciones, las emisiones de sustancias químicas peligrosas y la liberación de plástico al medio ambiente.

La tendencia en las cantidades de emisiones de sustancias químicas peligrosas califica alto en el criterio de relevancia, ya que capta la magnitud del flujo al medio ambiente de sustancias químicas que son amenazas potenciales para los EN-LP. A pesar de las mejoras en la gestión de emisiones y residuos en muchas jurisdicciones, se prevé que las emisiones de sustancias químicas sigan aumentando, con los consiguientes efectos sobre los ecosistemas y la salud humana; por ejemplo, se prevé que los objetivos de reducción hasta 2030 no se cumplan en la Unión Europea con las tendencias y la evolución actuales. (63)

La factibilidad de esta variable de control depende de la definición de peligroso, así como de la disponibilidad de datos sobre las emisiones de sustancias peligrosas a escala mundial a lo largo del ciclo de vida de la sustancia química. Una posible fuente de datos son los Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) nacionales y regionales. (64) Sin embargo, muchos países carecen de este tipo de registros, el número de sustancias químicas reportadas es limitado, los reportes de emisiones suelen ser incompletos e inciertos, (65) y no se consideran todos los tipos de emisiones (por ejemplo, se capturan principalmente las emisiones de grandes fuentes puntuales por encima de

La exhaustividad de esta variable de control es limitada porque los peligros se definen en un ámbito limitado en términos de ecosistema y salud humana, y no en términos de umbrales biofísicos potenciales e interacciones con otros LPs.

ciertos volúmenes (66)). La creación de una variable de control basada en las emisiones con cobertura global para sólo una pequeña fracción del total de sustancias químicas requeriría numerosas suposiciones y dependería de la extrapolación de datos. La extrapolación es cuestionable cuando se pasa de países con inventarios de emisiones a

países que carecen de ellos. (67) No obstante, si se dispone de datos, este enfoque permite diferenciar determinadas sustancias químicas y usos químicos con un elevado potencial de liberación.

La exhaustividad de esta variable de control es limitada porque los peligros se definen en un ámbito limitado en términos de ecosistema y salud humana, y no en términos de umbrales biofísicos potenciales e interacciones con otros LPs. La elevada agregación de los datos reportados también disminuye la utilidad operativa, ya que diferentes sustancias (por ejemplo, gas arsina, diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos de arsénico) dentro del mismo grupo de sustancias reportado (por ejemplo, "arsénico y compuestos") diferirán ampliamente en su destino y comportamiento ambiental. El conocimiento de las propiedades toxicológicas también se limita a una pequeña subsección de sustancias químicas. (42) A pesar de sus deficiencias, esta variable de control tiene la ventaja de representar una exposición realista, aunque para un número limitado de sustancias químicas y no necesariamente a lo largo del ciclo de vida de una sustancia química.

En cuanto a la tendencia de las cantidades de plásticos liberadas al medio ambiente, Villarrubia-Gómez et al. (6) identificaron varias vías y mecanismos a través de los cuales la contaminación por plásticos puede influir en los umbrales biofísicos y modificar los procesos del sistema Tierra, lo que sugiere que esta variable de control tiene una gran relevancia potencial. Numerosos estudios han tratado de cuantificar la liberación global de plásticos en el medio ambiente. (7,46,47,68) Estos datos proporcionan información sobre los puntos críticos de emisión, pero ponen de relieve las limitaciones de los datos que reducen la viabilidad de esta variable de control. Por ejemplo, los países con una base industrial menos desarrollada carecen de recursos para controlar las pérdidas de plástico. Además, las

Ryberg et al. calcularon que alrededor del 2,4% de los plásticos producidos en todo el mundo se pierden en el medio ambiente, de los cuales dos tercios son macroplásticos y un tercio son microplásticos. La mayoría de los macroplásticos se pierden a causa de la basura y la mala gestión de los residuos.

diferentes formas de plástico tienen diferentes rutas de liberación. Ryberg et al. (46) calcularon que alrededor del 2,4% de los plásticos producidos en todo el mundo se pierden en el medio ambiente, de los cuales dos tercios son macroplásticos (>5 mm) y un tercio son microplásticos (~1 nm a 5 mm de tamaño). La mayoría de los macroplásticos se pierden a causa de la basura y la mala

gestión de los residuos. (46) Algunos microplásticos se pierden en el medio ambiente en su forma manufacturada, como nardos, copos, polvo y microperlas. (69-71) Esto hace que las estimaciones cuantitativas sean inciertas y plantea retos para el seguimiento y la evaluación de los efectos. En la actualidad se carece de métodos para relacionar los pasos de la vía de impacto desde la liberación de plásticos hasta la alteración del sistema Tierra, (46,72) lo que limita la exhaustividad de la liberación de plásticos como variable de control.

Impacto no deseado de nuevas entidades en los procesos del Sistema Tierra

La elección de una variable de control situada más a la derecha en la vía de impacto implicaría considerar la exposición y los efectos en términos de perturbación de los procesos del Sistema Tierra, lo que aumenta su relevancia. La viabilidad exigiría limitar el alcance de la variable de control a determinadas sustancias químicas ricas en datos y a ciertos puntos finales o subsistemas específicos de la Tierra, con lo que también se reduciría la exhaustividad. El límite planetario de esta variable de control representaría un nivel "seguro" de contaminación química. El objetivo es proteger la integridad de la biosfera de un determinado compartimento medioambiental (por ejemplo, los ecosistemas de agua dulce) de los efectos de las sustancias químicas incluidas en la evaluación.

En principio, la variable de control puede definirse para una escala espacial determinada, en función del volumen del compartimento y de su tasa de renovación. Todas las liberaciones de sustancias químicas tienen el potencial de ocupar partes del espacio operativo seguro dentro de este límite, de acuerdo con sus tasas de liberación y su potencial de persistencia y toxicidad ambiental. Sin embargo, la viabilidad se ve limitada por la necesidad de tener en cuenta el gran número de sustancias químicas producidas y liberadas (con las limitaciones de datos comentadas anteriormente), y la estimación de los efectos relacionados es todo un reto. En el caso de los productos químicos agrícolas, las estimaciones cuantitativas de los impactos pueden derivarse de la combinación de datos de aplicación en campo específicos de los cultivos (por ejemplo, de las etiquetas de los productos) con estadísticas de la superficie de producción de los cultivos (por ejemplo, FAOSTAT) como aproximación de la superficie tratada, las emisiones por unidad de masa aplicada y los impactos por unidad de masa emitida en un compartimento determinado (que podrían estimarse utilizando modelos de equilibrio de masas). En el caso de los productos químicos industriales, las estimaciones cuantitativas de los impactos pueden derivarse a lo largo del ciclo de vida del producto químico a partir de la combinación de datos de producción química y datos sobre usos, emisiones, destino y transporte en el medio ambiente (incluida la persistencia) y eliminación. En otras palabras, esto requiere información que también es necesaria para las variables de control al principio de la vía de impacto, e información adicional sobre la exposición ecológica y la potencia con respecto a los efectos relevantes del sistema Tierra.

Dado que esta variable de control se aproxima al nivel de efecto de los procesos del sistema Tierra, es posible establecer límites sólidos (y es la base de los enfoques de cargas críticas que ya se utilizan), pero no es muy exhaustiva, ya que la evaluación basada en compartimentos puede pasar por alto dinámicas a mayor escala. Para la mayoría de las sustancias químicas no se dispone de información fiable sobre los distintos aspectos relevantes que describen más o menos toda la vía de impacto a lo largo del ciclo de vida de la sustancia. Sin embargo, es probable que la presión química

acumulativa total sobre la integridad de la biosfera esté dominada por un número limitado de sustancias químicas (lo que refleja las cantidades producidas, utilizadas y liberadas al medio ambiente en combinación con las características inherentes de las sustancias químicas como la persistencia, la movilidad y la toxicidad). Posthuma y sus colegas investigaron la presión de toxicidad de más de 12 000 sustancias químicas en más de 22 000 masas de agua europeas y descubrieron que 15 compuestos explicaban casi el 99,5% de la presión de ecotoxicidad acumulada. (73) Walters et al. modelizaron el potencial de biomagnificación de las sustancias químicas orgánicas, contribuyendo así con otra herramienta para el escrutinio. (74) Aunque estos estudios se basan en modelos con varias limitaciones, como la interacción de nuevas entidades, el enfoque podría ayudar a priorizar clases de sustancias, patrones regionales o tendencias de efectos. Para que la vigilancia del límite planetario sea operativa, las sustancias químicas que dominan los impactos acumulativos podrían utilizarse como sustancias químicas "indicadoras". Éstos se identificarían en un proceso de preselección, combinando estimaciones del volumen o capacidad de producción (por ejemplo, estadísticas de mercado) con la persistencia ambiental (por ejemplo, utilizando la inversa de las estimaciones de la semivida de degradación como aproximación) y la potencia de impacto (por ejemplo, datos de ensayos de ecotoxicidad crónica). Para considerar la transformación de diversas sustancias químicas en productos de transformación persistentes, se podrían combinar los datos de producción total con las tasas de metabolismo de las sustancias químicas que contribuyen a la formación de esas sustancias químicas persistentes "indicadoras". Y, por último, la relación entre el impacto químico acumulado y el espacio disponible dentro del límite para un compartimento determinado de la biosfera podría definir si se transgrede el límite y en qué medida, permitiendo al mismo tiempo identificar las principales sustancias químicas contribuyentes.

Hay que tener en cuenta varios supuestos a la hora de definir el límite. En primer lugar, se parte de una mezcla y exposición homogéneas dentro del compartimento durante el periodo de tiempo considerado. Esta suposición es justa para el aire y quizás para el agua, pero menos aplicable a compartimentos más complejos como el suelo y los sedimentos, lo que da lugar a una subestimación de las exposiciones. En segundo lugar, la agregación de la ocupación del espacio operativo entre sustancias químicas asume la aditividad sin corregir los posibles efectos de mezcla, lo que da como máximo 1 orden de magnitud de incertidumbre, (75) además de al menos otro orden de magnitud de incertidumbre relacionado con las diferencias intra e interespecies para derivar las estimaciones de los efectos. (76) Otros supuestos a la hora de derivar el impacto acumulativo están relacionados con estimaciones de emisiones e impacto no espacializadas que ignoran las diferencias espaciales (por ejemplo, en la química del agua, la riqueza de especies, la vulnerabilidad de las especies, los índices de degradación), y con métodos de estimación aplicados para cubrir lagunas de datos en los patrones de uso/liberación y la persistencia, lo que arroja una incertidumbre potencial de 2-3 órdenes de magnitud. (77)

Otra variable de control centrada en los efectos podría considerar las alteraciones de los plásticos en la integridad de la biosfera, a través de los efectos físicos y tóxicos de los plásticos y los cambios resultantes en la distribución de las especies. Aunque la percepción de los impactos de la basura marina es mayor que las pruebas acumuladas de los impactos ecológicos, (78) las revisiones y metaanálisis de los datos experimentales publicados muestran que los microplásticos tienen efectos negativos en numerosas especies. (79-81) Los impactos de los microplásticos en organismos individuales y comunidades se han estudiado utilizando numerosos modelos de laboratorio, lo que ha permitido comprender los mecanismos de toxicidad en organismos marinos que van desde el zooplancton hasta los grandes vertebrados. (79,82) Aunque siguen existiendo desajustes entre las concentraciones y los tipos de microplásticos documentados en el medio ambiente y los utilizados en los estudios de efectos de laboratorio, (83) los metaanálisis permiten comprender de forma generalizada la toxicidad de las partículas microplásticas. Los modelos matemáticos recientemente desarrollados tienen en cuenta la gran diversidad de las propias partículas microplásticas, aplicando

factores de extrapolación para tener en cuenta la subestimación de las concentraciones e incluyendo la distribución de la sensibilidad de las especies basada en datos de ecotoxicidad, lo que permite una comparación más sólida de los conjuntos de datos. (84) La evaluación tradicional del riesgo de las sustancias químicas utiliza la relación entre la concentración ambiental prevista y una concentración prevista sin efecto (PEC/PNEC), un enfoque que se ha aplicado a los escenarios de exposición a los microplásticos, (85) encontrando que el 0,17% de las aguas superficiales oceánicas mundiales están en riesgo, y aumentando al 1,62% a finales de siglo. Además, es probable que las limitaciones inherentes a los métodos de muestreo utilizados habitualmente (es decir, centrados en micropartículas de mayor tamaño), junto con las limitaciones técnicas para detectar partículas más pequeñas a nanoescala, conduzcan a una subestimación de las concentraciones de microplásticos y nanoplásticos en el medio ambiente (86), lo que indica que la exposición y, por tanto, los riesgos son probablemente mayores. Además, se cree que el fondo marino y los sedimentos son el sumidero final de los plásticos (87,88) a través de la absorción en los ecosistemas marinos (89) (90) y los cambios en la densidad de las partículas y las tasas de hundimiento debido a la bioincrustación (91-93), por lo que se prevé que estos nichos y los organismos que los habitan sufran exposiciones más elevadas. La cuantificación de estas

Un número cada vez mayor de ENs se encuentran en lugares remotos del planeta y el número de lugares gravemente contaminados está aumentando a pesar de los esfuerzos de remediación... el rápido crecimiento de la diversidad y de los volúmenes de producción y liberación supera la capacidad de la sociedad para evaluar y gestionar las ENs... Se trata de una consternación global, por lo que se necesitan soluciones transfronterizas integradas y justas.

concentraciones ambientales, vías de exposición y destinos ecológicos (incluidos nichos adicionales) requiere más datos, y será importante para evaluar los escenarios de exposición que provocan alteraciones en la integridad de la biosfera. Podrían aplicarse varios enfoques diferentes para abordar las lagunas de datos. Un umbral basado en la toxicidad se fijaría en $PEC/PNEC = 1$, con superaciones de EN-LP ya evidentes en varias regiones. Sin embargo, serían necesarias deliberaciones adicionales para considerar los cambios en la distribución de las especies o las

sensibilidades, pasando de la toxicidad a la biodiversidad y la funcionalidad.

Debate y Conclusiones

Elección de la Variable de Control

El carácter de los EN-LPs difiere de los demás LPs, ya que no existe un nivel de fondo prehumano o una línea de base de NEs (con pocas excepciones, como los metales). Las EN-LP también es distinto por el número y la diversidad de ENs; la probabilidad de que aumenten en el futuro y los diversos impactos que pueden causar. Por lo tanto, se necesitan variables de control que se construyan de forma diferente a las de otros LPs. Como ya se ha dicho, las variables de control operativas son necesarias para fundamentar la acción y calibrar los avances.

Hemos presentado un conjunto de variables de control que captan varias de las complejidades y características de EN-LP, y que varían en viabilidad, relevancia y exhaustividad. Todas tienen sus puntos fuertes y débiles; ninguna de ellas cumple todos los criterios por sí sola. Concluimos que la naturaleza del Límite Planetario de Entidades Noveles exige varias variables de control diferentes, y que, conjuntamente, nuestro conjunto de variables de control constituye la base de una estrategia factible para alertar de los riesgos planetarios e informar de las acciones.

¿Estamos Transgrediendo el Límite Planetario de Entidades Noveles?

Una tendencia constante -captada por nuestras variables de control- es el aumento a lo largo del tiempo de la producción, la diversidad y la liberación mundial de ENs. A pesar de los grandes esfuerzos realizados en las últimas décadas, la evaluación de la seguridad y la consiguiente regulación de las sustancias químicas y otras ENs, así como la

capacidad de muchos países para llevar a cabo estas evaluaciones y hacer cumplir la normativa, no están a la altura de la velocidad de introducción de las nuevas ENs. Un número cada vez mayor de ENs se encuentran en lugares remotos del planeta y el número de lugares gravemente contaminados está aumentando a pesar de los esfuerzos de remediación. Además, se están reportando muchos efectos distintos y en parte interactivos (por ejemplo, sinérgicos) de las ENs sobre los sistemas físicos y ecológicos de la Tierra. En resumen, el rápido crecimiento de la diversidad y de los volúmenes de producción y liberación supera la capacidad de la sociedad para evaluar y gestionar las ENs. La carga planetaria ya es considerable. (1) Las grandes diferencias en la capacidad de gestión entre países de distintos niveles de ingresos significa que, incluso cuando se mejore la gestión de los productos químicos y los residuos en algunas jurisdicciones, las ENs seguirán produciéndose, utilizándose y eliminándose con una normativa y una aplicación insuficientes o inexistentes en otros lugares, por lo que las ENs seguirán emitiéndose al medio ambiente. (94) Se trata de una consternación global, por lo que se necesitan soluciones transfronterizas integradas y justas para abordar el problema de las emisiones de nuevas entidades, como la contaminación por plásticos. (95)

Hemos adoptado un enfoque basado en la ponderación de las pruebas para responder a la pregunta de si estamos transgrediendo el espacio operativo seguro del NE-PB a partir del conjunto de variables de control. Obligados por las crecientes tendencias temporales observadas en la mayoría de las variables de control, respondemos a la pregunta

Afirmamos que actualmente nos encontramos en una zona de superación del Límite Planetario de Entidades Noveles.

comparando el ritmo de cambio en la cantidad de sustancias químicas, incluidos los plásticos, que se producen y liberan al medio ambiente, en relación con nuestra capacidad para realizar evaluaciones de seguridad y controles. Sostenemos que el espacio

operativo seguro del EN-LP se supera cuando la producción y las emisiones anuales aumentan a un ritmo que supera la capacidad global de evaluación y control.

Basándonos en las pruebas aquí presentadas, afirmamos que actualmente nos encontramos en una zona de superación del Límite Planetario de Entidades Noveles. Además, aunque estabilizásemos o redujésemos la producción y las emisiones, los efectos debidos a nuestra transgresión del NE-PB seguirían siendo una amenaza debido a la persistencia de muchas nuevas entidades. Por lo tanto, concluimos que los aumentos en la producción y liberación de nuevas entidades no son consistentes con mantener a la humanidad dentro del espacio operativo seguro, a la luz de la capacidad global de gestión.

Invitamos a la comunidad investigadora a seguir trabajando, utilizando la vía de impacto y la comprensión del EN-LP que aquí se presenta, para desarrollar variables de control más operativas, una cuantificación más sólida de EN-LP y límites mejor definidos para las emisiones de ENs. Sin embargo, estos esfuerzos continuados de investigación deben ir

Volver al espacio operativo seguro sólo puede lograrse mediante la limitación global de las emisiones de ENs a un ritmo que sea proporcional a la capacidad física y química del sistema Tierra.

en paralelo con acciones urgentes para gestionar las amenazas actuales de EN-LP. Pueden recopilarse datos globales con una granularidad espacio temporal mejorada, pero esta actividad no debería retrasar la acción inmediata, con el objetivo de prevenir los daños en una fase más

temprana de la vía de impacto, antes de la fase de efectos sobre el sistema Tierra. Las medidas para reducir las liberaciones y emisiones de ENs al medio ambiente son esenciales, incluido un mayor grado de circularidad en las cadenas de suministro de productos, el diseño de materiales y productos, el diseño para el reciclaje y los productos químicos seguros y sostenibles. (96,97) También debemos abordar la cuestión de la distribución desigual de los recursos y la opulencia que impulsa el uso de los recursos y las emisiones (98) y dificulta su regulación eficaz.

Del mismo modo que las medidas destinadas a frenar el cambio climático pasaron de límites basados en la concentración o la descarga a topes fijos para las emisiones de gases de efecto invernadero, (99) se han hecho llamamientos para que se establezcan topes para la producción y el uso de plásticos. (7) Sugerimos que se necesita el mismo enfoque para todas las ENs, volver al espacio operativo seguro sólo puede lograrse mediante la limitación global de las emisiones de ENs a un ritmo que sea proporcional a la capacidad física y química del sistema Tierra.

Si queremos mitigar los daños actuales y evitar futuras sorpresas de amenazas desconocidas de EN-LP, es necesario un enfoque más preventivo y cauteloso basado en los peligros para hacer frente a las nuevas entidades. No somos ingenuos ante el considerable reto que supone reducir las emisiones de sustancias químicas y plásticos para respetar las EN-LP, sobre todo teniendo en cuenta que el bloqueo del suministro de sustancias químicas ofrece resistencia frente a tales cambios. El reciente llamamiento a la creación de un organismo internacional científico-normativo que supervise los productos químicos y los residuos (100) puede servir de foro para informar sobre las medidas necesarias para salvaguardar el sistema Tierra.

Referencias:

Este artículo hace referencia a otras 100 publicaciones.

- 1 UN Environment. Global Chemicals Outlook II - From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development ; 978-92-807-3745-5, 2019; p 700. Google Scholar
- 2 Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, Å.; Chapin, F. S. I.; Lambin, E.; Lenton, T. M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H. J.; Nykvist, B.; de Wit, C. A.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P. K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R. W.; Fabry, V. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, J. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecol. Soc.* 2009, 14 (2), 32 DOI: 10.5751/ES-03180-140232 [Crossref], Google Scholar
- 3 Steffen, W.; Richardson, K.; Rockstrom, J.; Cornell, S. E.; Fetzer, I.; Bennett, E. M.; Biggs, R.; Carpenter, S. R.; de Vries, W.; de Wit, C. A.; Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; Mace, G. M.; Persson, L. M.; Ramanathan, V.; Reyers, B.; Sörlin, S. Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science* 2015, 347 (6223), 1259855– 1259855, DOI: 10.1126/science.1259855 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 4 Diamond, M. L.; de Wit, C. A.; Molander, S.; Scheringer, M.; Backhaus, T.; Lohmann, R.; Arvidsson, R.; Bergman, A.; Hauschild, M.; Holoubek, I.; Persson, L.; Suzuki, N.; Vighi, M.; Zetzsch, C. Exploring the Planetary Boundary for Chemical Pollution. *Environ. Int.* 2015, 78, 8– 15, DOI: 10.1016/j.envint.2015.02.001 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 5 Persson, L. M.; Breitholtz, M.; Cousins, I. T.; de Wit, C. A.; MacLeod, M.; McLachlan, M. S. Confronting Unknown Planetary Boundary Threats from Chemical Pollution. *Environ. Sci. Technol.* 2013, 47 (22), 12619– 12622, DOI: 10.1021/es402501c [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 6 Villarrubia-Gómez, P.; Cornell, S. E.; Fabres, J. Marine Plastic Pollution as a Planetary Boundary Threat – The Drifting Piece in the Sustainability Puzzle. *Mar. Policy* 2018, 96, 213– 220, DOI: 10.1016/j.marpol.2017.11.035 [Crossref], Google Scholar
- 7 Lau, W. W. Y.; Shiran, Y.; Bailey, R. M.; Cook, E.; Stuchtey, M. R.; Koskella, J.; Velis, C. A.; Godfrey, L.; Boucher, J.; Murphy, M. B.; Thompson, R. C.; Jankowska, E.; Castillo Castillo, A.; Pilditch, T. D.; Dixon, B.; Koerselman, L.; Kosior, E.; Favoino, E.; Gutberlet, J.; Baulch, S.; Atreya, M. E.; Fischer, D.; He, K. K.; Petit, M. M.; Sumaila, U. R.; Neil, E.; Bernhofen, M. V.; Lawrence, K.; Palardy, J. E. Evaluating Scenarios toward Zero Plastic Pollution. *Science* 2020, 369 (6510), 1455– 1461, DOI: 10.1126/science.aba9475 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 8 Beaumont, N. J.; Aanesen, M.; Austen, M. C.; Börger, T.; Clark, J. R.; Cole, M.; Hooper, T.; Lindeque, P. K.; Pascoe, C.; Wyles, K. J. Global Ecological, Social and Economic Impacts of Marine Plastic. *Mar. Pollut. Bull.* 2019, 142, 189– 195, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.03.022 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 9 Landrigan, P. J.; Fuller, R.; Acosta, N. J. R.; Adeyi, O.; Arnold, R.; Basu, N.; Baldé, A. B.; Bertolini, R.; Bose-O'Reilly, S.; Boufford, J. I.; Breyse, P. N.; Chiles, T.; Mahidol, C.; Coll-Seck, A. M.; Cropper, M. L.; Fobil, J.; Fuster, V.; Greenstone, M.; Haines, A.; Hanrahan, D.; Hunter, D.; Khare, M.; Krupnick, A.; Lanphear, B.; Lohani, B.; Martin, K.; Mathiasen, K. V.; McTeer, M. A.; Murray, C. J. L.; Ndahimananjara, J. D.; Perera, F.; Potočnik, J.; Preker, A. S.; Ramesh, J.; Rockström, J.; Salinas, C.; Samson, L. D.; Sandilya, K.; Sly, P. D.; Smith, K. R.; Steiner, A.; Stewart, R. B.; Suk, W. A.; van Schayck, O. C. P.; Yadama, G. N.; Yumkella, K.; Zhong, M. The Lancet Commission on Pollution and Health. *Lancet* 2018, 391 (10119), 462– 512, DOI: 10.1016/S0140-6736(17)32345-0 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 10 Diamond, M. L. Toxic Chemicals as Enablers and Poisoners of the Technosphere. *Anthr. Rev.* 2017, 4 (2), 72– 80, DOI: 10.1177/2053019617726308 [Crossref], Google Scholar
- 11 Grandjean, P.; Bellanger, M. Calculation of the Disease Burden Associated with Environmental Chemical Exposures: Application of Toxicological Information in Health Economic Estimation. *Environ. Health* 2017, 16 (1), 123, DOI: 10.1186/s12940-017-0340-3 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar

- 12 SAICM. SAICM Intersessional Process - Virtual Working Groups 2020–2021. <http://www.Saicm.Org/Beyond2020/IntersessionalProcess/VirtualWorkingGroups/Tabid/8563/Language/En-US/Default.aspx> (accessed 2021/1/25). Google Scholar
- 13 MacLeod, M.; Breitholtz, M.; Cousins, I. T.; Wit, C. A.; de Persson, L. M.; Rudén, C.; McLachlan, M. S. Identifying Chemicals That Are Planetary Boundary Threats. *Environ. Sci. Technol.* 2014, 48 (19), 11057–11063, DOI: 10.1021/es501893m [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 14 Arp, H. P. H.; Kühnel, D.; Rummel, C.; MacLeod, M.; Potthoff, A.; Reichelt, S.; Rojo-Nieto, E.; Schmitt-Jansen, M.; Sonnenberg, J.; Toorman, E.; Jahnke, A. Weathering Plastics as a Planetary Boundary Threat: Exposure, Fate, and Hazards. *Environ. Sci. Technol.* 2021, 22 (11), 7246–7255, DOI: 10.1021/acs.est.1c01512 [ACS Full Text], Google Scholar
- 15 Hochella, M. F.; Mogk, D. W.; Ranville, J.; Allen, I. C.; Luther, G. W.; Marr, L. C.; McGrail, B. P.; Murayama, M.; Qafoku, N. P.; Rosso, K. M.; Sahai, N.; Schroeder, P. A.; Vikesland, P.; Westerhoff, P.; Yang, Y. Natural, Incidental, and Engineered Nanomaterials and Their Impacts on the Earth System. *Science* 2019, 363 (6434), eaau8299, DOI: 10.1126/science.aau8299 [Crossref], [PubMed], Google Scholar
- 16 Sala, S.; Saouter, E. Planetary Boundaries and Chemical Pollution: A Grail Quest?. *Chem. Int.* 2014, 36 (6), 2, DOI: 10.1515/ci-2014-0603 [Crossref], [CAS], Google Scholar
- 17 Bernhardt, E. S.; Rosi, E. J.; Gessner, M. O. Synthetic Chemicals as Agents of Global Change. *Front. Ecol. Environ.* 2017, 15 (2), 84–90, DOI: 10.1002/fee.1450 [Crossref], Google Scholar
- 18 Perlinger, J. A.; Gorman, H. S.; Norman, E. S.; Obrist, D.; Selin, N. E.; Urban, N. R.; Wu, S. Measurement and Modeling of Atmosphere-Surface Exchangeable Pollutants (ASEPs) To Better Understand Their Environmental Cycling and Planetary Boundaries. *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50 (17), 8932–8934, DOI: 10.1021/acs.est.6b03447 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 19 Jahnke, A.; Arp, H. P. H.; Escher, B. I.; Gewert, B.; Gorokhova, E.; Kühnel, D.; Ogonowski, M.; Potthoff, A.; Rummel, C.; Schmitt-Jansen, M.; Toorman, E.; MacLeod, M. Reducing Uncertainty and Confronting Ignorance about the Possible Impacts of Weathering Plastic in the Marine Environment. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2017, 4 (3), 85–90, DOI: 10.1021/acs.estlett.7b00008 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 20 Napper, I. E.; Thompson, R. C. Environmental Deterioration of Biodegradable, Oxo-Biodegradable, Compostable, and Conventional Plastic Carrier Bags in the Sea, Soil, and Open-Air Over a 3-Year Period. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53 (9), 4775–4783, DOI: 10.1021/acs.est.8b06984 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 21 Chiba, S.; Saito, H.; Fletcher, R.; Yogi, T.; Kayo, M.; Miyagi, S.; Ogido, M.; Fujikura, K. Human Footprint in the Abyss: 30 Year Records of Deep-Sea Plastic Debris. *Mar. Policy* 2018, 96, 204–212, DOI: 10.1016/j.marpol.2018.03.022 [Crossref], Google Scholar
- 22 Royer, S.-J.; Ferrón, S.; Wilson, S. T.; Karl, D. M. Production of Methane and Ethylene from Plastic in the Environment. *PLoS One* 2018, 13 (8), e0200574, DOI: 10.1371/journal.pone.0200574 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 23 Shen, M.; Huang, W.; Chen, M.; Song, B.; Zeng, G.; Zhang, Y. (Micro)Plastic Crisis: Un-Ignorable Contribution to Global Greenhouse Gas Emissions and Climate Change. *J. Cleaner Prod.* 2020, 254, 120138, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120138 [Crossref], [CAS], Google Scholar
- 24 Zheng, J.; Suh, S. Strategies to Reduce the Global Carbon Footprint of Plastics. *Nat. Clim. Change* 2019, 9 (5), 374–378, DOI: 10.1038/s41558-019-0459-z [Crossref], Google Scholar
- 25 GESAMP. Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: Part 2 of a Global Assessment. IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/ UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Rep. Stud. GESAMP No. 93. , 2016. Google Scholar
- 26 Maxwell, S. L.; Fuller, R. A.; Brooks, T. M.; Watson, J. E. M. Biodiversity: The Ravages of Guns, Nets and Bulldozers. *Nature* 2016, 536 (7615), 143–145, DOI: 10.1038/536143a [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 27 Sala, S.; Goralczyk, M. Chemical Footprint: A Methodological Framework for Bridging Life Cycle Assessment and Planetary Boundaries for Chemical Pollution: Chemical Footprint Methodology for Aquatic Ecosystems. *Integr. Environ. Assess. Manage.* 2013, 9 (4), 623–632, DOI: 10.1002/ieam.1471 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 28 Posthuma, L.; Bjørn, A.; Zijp, M. C.; Birkved, M.; Diamond, M. L.; Hauschild, M. Z.; Huijbregts, M. A. J.; Mulder, C.; Van de Meent, D. Chemical Footprints: Thin Boundaries Support Environmental Quality Management. *Environ. Sci. Technol.* 2014, 48 (22), 13025–13026, DOI: 10.1021/es505004n [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 29 Bjørn, A.; Diamond, M.; Birkved, M.; Hauschild, M. Z. Chemical Footprint Method for Improved Communication of Freshwater Ecotoxicity Impacts in the Context of Ecological Limits. *Environ. Sci. Technol.* 2014, 48 (22), 13253–13262, DOI: 10.1021/es503797d [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 30 Reppas-Chrysovitinos, E.; Sobek, A.; MacLeod, M. Screening-Level Exposure-Based Prioritization to Identify Potential POPs, VPvBs and Planetary Boundary Threats among Arctic Contaminants. *Emerg. Contam.* 2017, 3 (2), 85–94, DOI: 10.1016/j.emcon.2017.06.001 [Crossref], Google Scholar
- 31 Sobek, A.; Bejgarn, S.; Rudén, C.; Breitholtz, M. The Dilemma in Prioritizing Chemicals for Environmental Analysis: Known versus Unknown Hazards. *Env. Sci. Process. Impacts* 2016, 18, 1042, DOI: 10.1039/C6EM00163G [Crossref], [PubMed], Google Scholar
- 32 Rial, J. A.; Pielke Sr, R. A.; Beniston, M.; Claussen, M.; Canadell, J.; Cox, P.; Held, H.; de Noblet-Ducoudré, N.; Prinn, R.; Reynolds, J. F.; Salas, J. D. Nonlinearities, Feedbacks and Critical Thresholds within the Earth's Climate System. *Clim. Change* 2004, 65 (1/2), 11–38, DOI: 10.1023/B:CLIM.0000037493.89489.3f [Crossref], Google Scholar
- 33 Scheffer, M.; Carpenter, S.; Foley, J. A.; Folke, C.; Walker, B. Catastrophic Shifts in Ecosystems. *Nature* 2001, 413 (6856), 591–596, DOI: 10.1038/35098000 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 34 EEA. Chemicals for a Sustainable Future: Report of the EEA Scientific Committee Seminar: Copenhagen, 17 May 2017; European Environment Agency; Publications Office: LU, 2018. Google Scholar

- 35 Wang, Z.; Walker, G. W.; Muir, D. C. G.; Nagatani-Yoshida, K. Toward a Global Understanding of Chemical Pollution: A First Comprehensive Analysis of National and Regional Chemical Inventories. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54 (5), 2575– 2584, DOI: 10.1021/acs.est.9b06379 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 36 Levi, P. G.; Cullen, J. M. Mapping Global Flows of Chemicals: From Fossil Fuel Feedstocks to Chemical Products. *Environ. Sci. Technol.* 2018, 52 (4), 1725– 1734, DOI: 10.1021/acs.est.7b04573 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 37 Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L. Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Sci. Adv.* 2017, 3 (7), e1700782, DOI: 10.1126/sciadv.1700782 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 38 Søgaard Jørgensen, P.; Folke, C.; Henriksson, P. J. G.; Malmros, K.; Troell, M.; Zorzet, A. Coevolutionary Governance of Antibiotic and Pesticide Resistance. *Trends Ecol. Evol.* 2020, 35 (6), 484– 494, DOI: 10.1016/j.tree.2020.01.011 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 39 Unruh, G. C. Understanding Carbon Lock-In. *Energy Policy* 2000, 28 (12), 817– 830, DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00070-7 [Crossref], Google Scholar
- 40 Beddoe, R.; Costanza, R.; Farley, J.; Garza, E.; Kent, J.; Kubiszewski, I.; Martinez, L.; McCowen, T.; Murphy, K.; Myers, N.; Ogden, Z.; Stapleton, K.; Woodward, J. Overcoming Systemic Roadblocks to Sustainability: The Evolutionary Redesign of Worldviews, Institutions, and Technologies. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2009, 106 (8), 2483– 2489, DOI: 10.1073/pnas.0812570106 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 41 Alaei, M. An Overview of Commercially Used Brominated Flame Retardants, Their Applications, Their Use Patterns in Different Countries/Regions and Possible Modes of Release. *Environ. Int.* 2003, 29 (6), 683– 689, DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00121-1 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 42 Kristiansson, E.; Coria, J.; Gunnarsson, L.; Gustavsson, M. Does the Scientific Knowledge Reflect the Chemical Diversity of Environmental Pollution? – A Twenty-Year Perspective. *Environ. Sci. Policy* 2021, 126, 90– 98, DOI: 10.1016/j.envsci.2021.09.007 [Crossref], [CAS], Google Scholar
- 43 CEFIC. Fact and Figures of the European Chemical Industry 2018. CEFIC. 2018. Google Scholar
- 44 Rochman, C. M.; Hoh, E.; Kurobe, T.; Teh, S. J. Ingested Plastic Transfers Hazardous Chemicals to Fish and Induces Hepatic Stress. *Sci. Rep.* 2013, 3 (1), 3263, DOI: 10.1038/srep03263 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 45 Geyer, R. Production, Use, and Fate of Synthetic Polymers. In *Plastic Waste and Recycling*; Elsevier, 2020; pp 13– 32. DOI: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5 . [Crossref], Google Scholar
- 46 Ryberg, M. W.; Hauschild, M. Z.; Wang, F.; Averous-Monnelly, S.; Laurent, A. Global Environmental Losses of Plastics across Their Value Chains. *Resour. Conserv. Recycl.* 2019, 151, 104459, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104459 [Crossref], Google Scholar
- 47 Borrelle, S. B.; Ringma, J.; Law, K. L.; Monnahan, C. C.; Lebreton, L.; McGivern, A.; Murphy, E.; Jambeck, J.; Leonard, G. H.; Hilleary, M. A.; Eriksen, M.; Possingham, H. P.; De Frond, H.; Gerber, L. R.; Polidoro, B.; Tahir, A.; Bernard, M.; Mallos, N.; Barnes, M.; Rochman, C. M. Predicted Growth in Plastic Waste Exceeds Efforts to Mitigate Plastic Pollution. *Science* 2020, 369 (6510), 1515– 1518, DOI: 10.1126/science.aba3656 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 48 Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. Plastics Recycling: Challenges and Opportunities. *Philos. Trans. R. Soc., B* 2009, 364 (1526), 2115– 2126, DOI: 10.1098/rstb.2008.0311 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 49 Nielsen, T. D.; Hasselbalch, J.; Holmberg, K.; Stripple, J. Politics and the Plastic Crisis: A Review throughout the Plastic Life Cycle. *Wiley Interdiscip. Rev.: Energy Environ.* 2020, 9 (1). DOI: 10.1002/wene.360 . [Crossref], Google Scholar
- 50 Lebreton, L.; Andrady, A. Future Scenarios of Global Plastic Waste Generation and Disposal. *Palgrave Commun.* 2019, 5 (1), 6, DOI: 10.1057/s41599-018-0212-7 [Crossref], Google Scholar
- 51 Cousins, I. T.; Ng, C. A.; Wang, Z.; Scheringer, M. Why Is High Persistence Alone a Major Cause of Concern?. *Environ. Sci. Process. Impacts* 2019, 21 (5), 781– 792, DOI: 10.1039/C8EM00515J [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 52 Fenner, K.; Scheringer, M. The Need for Chemical Simplification As a Logical Consequence of Ever-Increasing Chemical Pollution. *Environ. Sci. Technol.* 2021, 55, acs.est.1c04903, DOI: 10.1021/acs.est.1c04903 [ACS Full Text], Google Scholar
- 53 Stieger, G.; Scheringer, M.; Ng, C. A.; Hungerbühler, K. Assessing the Persistence, Bioaccumulation Potential and Toxicity of Brominated Flame Retardants: Data Availability and Quality for 36 Alternative Brominated Flame Retardants. *Chemosphere* 2014, 116, 118– 123, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.083 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 54 CEFIC. The European Chemical Industry - a Vital Part of Europe's Future, Facts and Figures 2021; The European Chemical Industry Council, CEFIC, 2021. Google Scholar
- 55 ECHA. Universe of Registered Substances. European Chemicals Agency, ECHA. <https://Echa.Europa.Eu/Fr/Universe-of-Registered-Substances> (accessed 2021/5/25). Google Scholar
- 56 Sha, B.; Johansson, J. H.; Benskin, J. P.; Cousins, I. T.; Salter, M. E. Influence of Water Concentrations of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) on Their Size-Resolved Enrichment in Nascent Sea Spray Aerosols. *Environ. Sci. Technol.* 2021, 55, acs.est.0c03804, DOI: 10.1021/acs.est.0c03804 [ACS Full Text], Google Scholar
- 57 Johansson, J. H.; Salter, M. E.; Acosta Navarro, J. C.; Leck, C.; Nilsson, E. D.; Cousins, I. T. Global Transport of Perfluoroalkyl Acids via Sea Spray Aerosol. *Environ. Sci. Process. Impacts* 2019, 21 (4), 635– 649, DOI: 10.1039/C8EM00525G [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 58 Vaida, V. Ocean Sea Spray, Clouds, and Climate. *ACS Cent. Sci.* 2015, 1 (3), 112– 114, DOI: 10.1021/acscentsci.5b00210 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 59 Jørgensen, P. S.; Aktipis, A.; Brown, Z.; Carrière, Y.; Downes, S.; Dunn, R. R.; Epstein, G.; Frisvold, G. B.; Hawthorne, D.; Gröhn, Y. T.; Gujar, G. T.; Jasovský, D.; Klein, E. Y.; Klein, F.; Lhermie, G.; Mota-Sanchez, D.; Omoto, C.; Schlüter, M.; Scott, H. M.; Wernli, D.; Carroll, S. P.; Living with Resistance project Antibiotic and Pesticide Susceptibility and the Anthropocene Operating Space. *Nat. Sustainable* 2018, 1 (11), 632– 641, DOI: 10.1038/s41893-018-0164-3 [Crossref], Google Scholar

- 60 Sühling, R.; Diamond, M. L.; Bernstein, S.; Adams, J. K.; Schuster, J. K.; Fernie, K.; Elliott, K.; Stern, G.; Jantunen, L. M. Organophosphate Esters in the Canadian Arctic Ocean. *Environ. Sci. Technol.* 2021, 55 (1), 304–312, DOI: 10.1021/acs.est.0c04422 [ACS Full Text], Google Scholar
- 61 Peng, X.; Chen, M.; Chen, S.; Dasgupta, S.; Xu, H.; Ta, K.; Du, M.; Li, J.; Guo, Z.; Bai, S. Microplastics Contaminate the Deepest Part of the World's Ocean. *Geochem. Perspect. Lett.* 2018, 1–5, DOI: 10.7185/geochemlet.1829 [Crossref], Google Scholar
- 62 Napper, I. E.; Davies, B. F. R.; Clifford, H.; Elvin, S.; Koldewey, H. J.; Mayewski, P. A.; Miner, K. R.; Potocki, M.; Elmore, A. C.; Gajurel, A. P.; Thompson, R. C. Reaching New Heights in Plastic Pollution—Preliminary Findings of Microplastics on Mount Everest. *One Earth* 2020, 3 (5), 621–630, DOI: 10.1016/j.oneear.2020.10.020 [Crossref], Google Scholar
- 63 EEA. The European Environment: State and Outlook 2020: Knowledge for Transition to a Sustainable Europe; European Environment Agency; Publications Office: LU, 2019. Google Scholar
- 64 UNECE. About PRTR. <https://Prtr.Unece.Org/about-PRTR> (accessed 2021/11/13). Google Scholar
- 65 Galarneau, E.; Makar, P. A.; Sassi, M.; Diamond, M. L. Estimation of Atmospheric Emissions of Six Semivolatile Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Southern Canada and the United States by Use of an Emissions Processing System. *Environ. Sci. Technol.* 2007, 41 (12), 4205–4213, DOI: 10.1021/es062303k [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 66 EC. European Commission, European Pollutant Release and Transfer Register, EPRTR. <https://Ec.Europa.Eu/Environment/Industry/Stationary/e-Prtr/Legislation.Htm> (accessed 2021/5/4). Google Scholar
- 67 Oberschelp, C.; Pfister, S.; Raptis, C. E.; Hellweg, S. Global Emission Hotspots of Coal Power Generation. *Nat. Sustain.* 2019, 2 (2), 113–121, DOI: 10.1038/s41893-019-0221-6 [Crossref], Google Scholar
- 68 Jambeck, J. R.; Geyer, R.; Wilcox, C.; Siegler, T. R.; Perryman, M.; Andrady, A.; Narayan, R.; Law, K. L. Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean. *Science* 2015, 347 (6223), 768–771, DOI: 10.1126/science.1260352 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 69 Karlsson, T. M.; Arneborg, L.; Broström, G.; Almroth, B. C.; Gipperth, L.; Hassellöv, M. The Unaccountability Case of Plastic Pellet Pollution. *Mar. Pollut. Bull.* 2018, 129 (1), 52–60, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.01.041 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 70 Fendall, L. S.; Sewell, M. A. Contributing to Marine Pollution by Washing Your Face: Microplastics in Facial Cleansers. *Mar. Pollut. Bull.* 2009, 58 (8), 1225–1228, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2009.04.025 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 71 OSPAR Commission. OSPAR Background Document on Pre-Production Plastic Pellets. <https://www.ospar.org/documents?v=39764> (accessed 2021–11–13). Google Scholar
- 72 European Commission. Directorate General for Research and Innovation. A Circular Economy for Plastics: Insights from Research and Innovation to Inform Policy and Funding Decisions; Publications Office: LU, 2019. Google Scholar
- 73 Posthuma, L.; van Gils, J.; Zijp, M. C.; van de Meent, D.; de Zwart, D. Species Sensitivity Distributions for Use in Environmental Protection, Assessment, and Management of Aquatic Ecosystems for 12 386 Chemicals. *Environ. Toxicol. Chem.* 2019, 38 (4), 905–917, DOI: 10.1002/etc.4373 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 74 Walters, D. M.; Jardine, T. D.; Cade, B. S.; Kidd, K. A.; Muir, D. C. G.; Leipzig-Scott, P. Trophic Magnification of Organic Chemicals: A Global Synthesis. *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50 (9), 4650–4658, DOI: 10.1021/acs.est.6b00201 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 75 Escher, B. I.; Stapleton, H. M.; Schymanski, E. L. Tracking Complex Mixtures of Chemicals in Our Changing Environment. *Science* 2020, 367 (6476), 388–392, DOI: 10.1126/science.aay6636 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 76 Aurisano, N.; Albizzati, P. F.; Hauschild, M.; Fantke, P. Extrapolation Factors for Characterizing Freshwater Ecotoxicity Effects. *Environ. Toxicol. Chem.* 2019, 38 (11), 2568–2582, DOI: 10.1002/etc.4564 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 77 Kounina, A.; Margni, M.; Shaked, S.; Bulle, C.; Jolliet, O. Spatial Analysis of Toxic Emissions in LCA: A Sub-Continental Nested USEtox Model with Freshwater Archetypes. *Environ. Int.* 2014, 69, 67–89, DOI: 10.1016/j.envint.2014.04.004 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 78 Rochman, C. M.; Browne, M. A.; Underwood, A. J.; van Franeker, J. A.; Thompson, R. C.; Amaral-Zettler, L. A. The Ecological Impacts of Marine Debris: Unraveling the Demonstrated Evidence from What Is Perceived. *Ecology* 2016, 97 (2), 302–312, DOI: 10.1890/14-2070.1 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 79 Bucci, K.; Tulio, M.; Rochman, C. M. What Is Known and Unknown about the Effects of Plastic Pollution: A Meta-analysis and Systematic Review. *Ecol. Appl.* 2020, 30 (2). DOI: 10.1002/eap.2044 [Crossref], [PubMed], Google Scholar
- 80 Salerno, M.; Berlino, M.; Mangano, M. C.; Sarà, G. Microplastics and the Functional Traits of Fishes: A Global Meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 2021, 27 (12), 2645–2655, DOI: 10.1111/gcb.15570 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 81 Arias-Andres, M.; Rojas-Jimenez, K.; Grossart, H.-P. Collateral Effects of Microplastic Pollution on Aquatic Microorganisms: An Ecological Perspective. *TrAC, Trends Anal. Chem.* 2019, 112, 234–240, DOI: 10.1016/j.trac.2018.11.041 [Crossref], [CAS], Google Scholar
- 82 Seeley, M. E.; Song, B.; Passie, R.; Hale, R. C. Microplastics Affect Sedimentary Microbial Communities and Nitrogen Cycling. *Nat. Commun.* 2020, 11 (1), 2372, DOI: 10.1038/s41467-020-16235-3 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 83 Phuong, N. N.; Zalouk-Vergnoux, A.; Poirier, L.; Kamari, A.; Châtel, A.; Mouneyrac, C.; Lagarde, F. Is There Any Consistency between the Microplastics Found in the Field and Those Used in Laboratory Experiments?. *Environ. Pollut.* 2016, 211, 111–123, DOI: 10.1016/j.envpol.2015.12.035 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 84 Koelmans, A. A.; Redondo-Hasselerharm, P. E.; Mohamed Nor, N. H.; Kooi, M. Solving the Nonalignment of Methods and Approaches Used in Microplastic Research to Consistently Characterize Risk. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54 (19), 12307–12315, DOI: 10.1021/acs.est.0c02982 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 85 Everaert, G.; De Rijcke, M.; Lonzeville, B.; Janssen, C. R.; Backhaus, T.; Mees, J.; van Sebille, E.; Koelmans, A. A.; Catarino, A. I.; Vandegehuchte, M. B. Risks of Floating Microplastic in the Global Ocean. *Environ. Pollut.* 2020, 267, 115499, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115499 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar

- 86 Lindeque, P. K.; Cole, M.; Coppock, R. L.; Lewis, C. N.; Miller, R. Z.; Watts, A. J. R.; Wilson-McNeal, A.; Wright, S. L.; Galloway, T. S. Are We Underestimating Microplastic Abundance in the Marine Environment? A Comparison of Microplastic Capture with Nets of Different Mesh-Size. *Environ. Pollut.* 2020, 265, 114721, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114721 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 87 Peng, G.; Bellerby, R.; Zhang, F.; Sun, X.; Li, D. The Ocean's Ultimate Trashcan: Hadal Trenches as Major Depositories for Plastic Pollution. *Water Res.* 2020, 168, 115121, DOI: 10.1016/j.watres.2019.115121 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 88 Kane, I. A.; Clare, M. A.; Miramontes, E.; Wogelius, R.; Rothwell, J. J.; Garreau, P.; Pohl, F. Seafloor Microplastic Hotspots Controlled by Deep-Sea Circulation. *Science* 2020, 368 (6495), 1140– 1145, DOI: 10.1126/science.aba5899 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 89 Choy, C. A.; Robison, B. H.; Gagne, T. O.; Erwin, B.; Firl, E.; Halden, R. U.; Hamilton, J. A.; Katija, K.; Lysin, S. E.; Rolsky, C.; S. Van Houtan, K. The Vertical Distribution and Biological Transport of Marine Microplastics across the Epipelagic and Mesopelagic Water Column. *Sci. Rep.* 2019, 9 (1), 7843, DOI: 10.1038/s41598-019-44117-2 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 90 Kane, I. A.; Clare, M. A. Dispersion, Accumulation, and the Ultimate Fate of Microplastics in Deep-Marine Environments: A Review and Future Directions. *Front. Earth Sci.* 2019, 7, 80, DOI: 10.3389/feart.2019.00080 [Crossref], Google Scholar
- 91 Fazez, F. M. C.; Ryan, P. G. Biofouling on Buoyant Marine Plastics: An Experimental Study into the Effect of Size on Surface Longevity. *Environ. Pollut.* 2016, 210, 354– 360, DOI: 10.1016/j.envpol.2016.01.026 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 92 Ryan, P. G. How Quickly Do Albatrosses and Petrels Digest Plastic Particles?. *Environ. Pollut.* 2015, 207, 438– 440, DOI: 10.1016/j.envpol.2015.08.005 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 93 Holmström, A. Plastic Films on the Bottom of the Skagerack. *Nature* 1975, 255 (5510), 622– 623, DOI: 10.1038/255622a0 [Crossref], [CAS], Google Scholar
- 94 Zhang, Q.; Jiang, X.; Tong, D.; Davis, S. J.; Zhao, H.; Geng, G.; Feng, T.; Zheng, B.; Lu, Z.; Streets, D. G.; Ni, R.; Brauer, M.; van Donkelaar, A.; Martin, R. V.; Huo, H.; Liu, Z.; Pan, D.; Kan, H.; Yan, Y.; Lin, J.; He, K.; Guan, D. Transboundary Health Impacts of Transported Global Air Pollution and International Trade. *Nature* 2017, 543 (7647), 705– 709, DOI: 10.1038/nature21712 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 95 Borrelle, S. B.; Rochman, C. M.; Liboiron, M.; Bond, A. L.; Lusher, A.; Bradshaw, H.; Provencher, J. F. Opinion: Why We Need an International Agreement on Marine Plastic Pollution. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2017, 114 (38), 9994– 9997, DOI: 10.1073/pnas.1714450114 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 96 Wang, Z.; Hellweg, S. First Steps Toward Sustainable Circular Uses of Chemicals: Advancing the Assessment and Management Paradigm. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2021, 9 (20), 6939– 6951, DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c00243 [ACS Full Text], [CAS], Google Scholar
- 97 Aurisano, N.; Weber, R.; Fantke, P. Enabling a Circular Economy for Chemicals in Plastics. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2021, 31, 100513, DOI: 10.1016/j.cogsc.2021.100513 [Crossref], Google Scholar
- 98 Wiedmann, T.; Lenzen, M.; Keyßer, L. T.; Steinberger, J. K. Scientists' Warning on Affluence. *Nat. Commun.* 2020, 11 (1), 3107, DOI: 10.1038/s41467-020-16941-y [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 99 Asheim, G. B.; Fæhn, T.; Nyborg, K.; Greker, M.; Hagem, C.; Harstad, B.; Hoel, M. O.; Lund, D.; Rosendahl, K. E. The Case for a Supply-Side Climate Treaty. *Science* 2019, 365 (6451), 325– 327, DOI: 10.1126/science.aax5011 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar
- 100 Wang, Z.; Altenburger, R.; Backhaus, T.; Covaci, A.; Diamond, M. L.; Grimalt, J. O.; Lohmann, R.; Schäffer, A.; Scheringer, M.; Selin, H.; Soehl, A.; Suzuki, N. We Need a Global Science-Policy Body on Chemicals and Waste. *Science* 2021, 371 (6531), 774– 776, DOI: 10.1126/science.abe9090 [Crossref], [PubMed], [CAS], Google Scholar

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
 - Álvaro de Regil Castilla: [Transitando a Geocracia — Paradigma de la Gente y el Planeta y No el Mercado — Primeros Pasos](#)
 - John Bellamy Foster: [Ecología y el Futuro de la Historia](#)
 - Alberto Garzón Espinosa: [Los límites del crecimiento: ecosocialismo o barbarie](#)
 - Will Steffen et al: [Trayectorias del Sistema Tierra en el Antropoceno](#)
 - Johan Rockström et al: [Identificando un Pasaje Seguro y Justo para las Personas y el Planeta](#)
 - Narasimha D. Rao y Jihoon Min: [Normas de Vida Digna: Necesidades Materiales para el Bienestar Humano](#)
-

❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un etos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.

❖ **Autores de contacto:** **Linn Persson** - Stockholm Environment Institute, Linnégatan 87D, Box 24218, 104 51 Estocolmo, Suecia; Dirección actual: Sociedad Sueca para la Conservación de la Naturaleza, SSNC, Box 4625, 116 91 Estocolmo, e investigadora afiliada al Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, Suecia; <https://orcid.org/0000-0002-7110-7089>; Email: linn.persson@ssnc.se **Cynthia A. de Wit** - Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad de Estocolmo, 106 91 Estocolmo, Suecia; <https://orcid.org/0000-0001-8497-2699>; Email: cynthia.deWit@aces.su.se

❖ **Autores:** **Bethanie M. Carney Almroth** - Departamento de Biología y Ciencias Ambientales, Universidad de Gotemburgo, Box 465, 405 30 Gotemburgo, Suecia; <https://orcid.org/0000-0002-5037-4612> **Christopher D. Collins** - Departamento de Geografía y Ciencias Ambientales, Universidad de Reading, PO Box 217, Reading, Berkshire, RG6 6AH, Reino Unido; <https://orcid.org/0000-0002-8282-2803> **Sarah Cornell** - Centro de Resiliencia de Estocolmo, Universidad de Estocolmo, 106 91 Estocolmo, Suecia; <https://orcid.org/0000-0003-4367-1296> **Miriam L. Diamond** - Department of Earth Sciences; and School of the Environment, University of Toronto, Toronto, Canada M5S 3B1; <https://orcid.org/0000-0001-6296-6431> **Peter Fantke** - Quantitative Sustainability Assessment, Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark, Produktionstorvet 424, 2800, Kgs. Lyngby, Dinamarca; <https://orcid.org/0000-0001-7148-6982> **Martin Hassellöv** - Department of Marine Sciences, University of Gothenburg, Box 100, 405 30 Gothenburg, Suecia **Matthew MacLeod** - Department of Environmental Science, Stockholm University, 106 91 Stockholm, Suecia; <https://orcid.org/0000-0003-2562-7339> **Morten W. Ryberg** - Quantitative Sustainability Assessment, Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark, Produktionstorvet 424, 2800, Kgs. Lyngby, Dinamarca; <https://orcid.org/0000-0003-2589-8729> **Peter Søgaard Jørgensen** - Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, 106 91 Estocolmo, Suecia; **Lilla Frescativägen 4A, 104 05 Estocolmo, Suecia** **Patricia Villarrubia-Gómez** - Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, 106 91 Estocolmo, Suecia **Zhanyun Wang** - Institute of Environmental Engineering, ETH Zürich, 8093 Zürich, Suiza; <https://orcid.org/0000-0001-9914-7659> **Michael Zwicky Hauschild** - Quantitative Sustainability Assessment, Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark, Produktionstorvet 424, 2800, Kgs. Lyngby, Dinamarca

❖ **Agradecimientos:** Este trabajo se inició con un taller convocado como parte de Earth Resilience in the Anthropocene, un proyecto Advanced Investigator financiado por el Consejo Europeo de Investigación (subvención ERC-2016-ADG-743080). Agradecemos a Frida Åberg su excelente facilitación y apoyo técnico y de investigación. Se agradecen las valiosas aportaciones de todos los delegados del taller y la ayuda de Jonathan Blumenthal, de la Universidad de Toronto, para la elaboración de la Figura 2 y las Figuras SI. **Notas.** Los autores declaran no tener ningún interés económico en juego.

❖ **Información complementaria:** La información complementaria está disponible gratuitamente en <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c04158>. Figuras que ilustran la capacidad de producción mundial de siete sustancias químicas (Figuras S1-S7), la producción mundial de ingredientes activos de pesticidas (Figura S8), plásticos (Figura S9) y antibióticos (Figura S10), además de referencias (PDF).

❖ **Acerca de este trabajo:** Este artículo fue publicado originalmente en inglés por Environmental Science & Technology, enero 2022, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c04158>

❖ **Cite este trabajo como:** Linn Persson et al.: Fuera del Espacio Operativo Seguro del Límite Planetario para Entidades Noveles – La Alianza Global Jus Semper, marzo de 2023.

❖ **Licencia Creative Commons:** Este artículo se ha publicado bajo la licencia Creative Commons, Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0.). Esta licencia permite a los usuarios copiar y distribuir el material en cualquier medio o formato en forma no adaptada, sólo para fines no comerciales y siempre que se cite al creador.

❖ **Etiquetas:** Capitalismo, contaminación química, contaminación por plásticos, amenazas desconocidas para los límites planetarios, impactos sobre el sistema Tierra, limitación de las emisiones, capacidad de gestión de los productos químicos.

❖ La responsabilidad por las opiniones expresadas en los trabajos firmados descansa exclusivamente en su(s) autor(es), y su publicación no representa un respaldo por parte de La Alianza Global Jus Semper a dichas opiniones.



Bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>

© 2023. La Alianza Global Jus Semper
Portal en red: https://www.jussemper.org/Inicio/Index_castellano.html
Correo-e: informa@jussemper.org