

DOCTRINA

Desechos espaciales: Revisión de un dilema del derecho internacional y su impacto en la sostenibilidad espacial

Space debris: A review of an international law dilemma and its impact on space sustainability

Daniela Chapetón Ríos  y Jennifer Ochoa Prieto 

Investigadoras independientes, Colombia

RESUMEN Esta revisión de literatura aborda el desafío que representa la carencia de mecanismos de gestión en el ámbito en el derecho internacional respecto a los desechos espaciales acumulados en el espacio ultraterrestre, así como la integración de esta problemática dentro del marco del derecho internacional ambiental. El objetivo central de este estudio es determinar si la generación de basura espacial constituye una amenaza para la sostenibilidad espacial, considerando sus implicaciones en la dimensión ambiental, económica y social. Con este fin, el artículo se estructura en tres secciones principales. En la primera parte se presenta una definición detallada de los conceptos de desecho y sostenibilidad espacial, estableciendo un marco conceptual sólido para el análisis. En segundo lugar, se realiza una aproximación a los desafíos ambientales, económicos y sociales a mediano y largo plazo que plantea la creciente acumulación de residuos en el espacio para la sostenibilidad de la relación espacio-Tierra, como consecuencia de su crecimiento exponencial. La tercera y última parte del texto identifica y discute los vacíos existentes en el derecho internacional ambiental en lo que respecta a la sostenibilidad y la gestión de residuos espaciales. A partir del análisis de teorías como el síndrome de Kessler y la reflexión de esfuerzos mundiales como el UNISPACE+50, el artículo plantea un dilema regulatorio en el ámbito del derecho espacial internacional. Se señala la existencia de normativas desactualizadas que no logran establecer una conexión adecuada entre la problemática de los desechos espaciales y su impacto en la sostenibilidad. La conclusión subraya la urgente necesidad de adoptar un enfoque integrador que permita abordar de manera efectiva esta problemática global, instando a la revisión y fortalecimiento del marco normativo internacional vigente, desde una perspectiva integral.

PALABRAS CLAVE Desechos espaciales, derecho internacional ambiental, sostenibilidad espacial, impacto ambiental espacial.

ABSTRACT This literature review addresses the challenge of the lack of management mechanisms in international law in relation to space debris accumulated in outer space, as well as the integration of this issue within the framework of international environmental law. The central objective is to determine whether the generation of space debris constitutes a threat to space sustainability, considering its implications in environmental, economic, and social dimensions. To this end, the article is divided into three main sections. The first part presents a conceptualization of the concepts of space debris and space sustainability, establishing a solid conceptual framework for the analysis. Second, an approach is presented for addressing the medium- and long-term environmental, economic, and social challenges that space-earth sustainability faces because of the debris accumulation caused by space debris' exponential expansion. The third and final part identifies and discusses the existing gaps in international environmental law in terms of sustainability and space debris management. Based on the analysis of theories like Kessler Syndrome and the reflection of global efforts such as UNISPACE+50, the article will propose a regulatory dilemma in the field of international space law. It points to outdated regulations that fail to adequately connect the necessary correlation between space debris issues and their impact on sustainability. The conclusion underlines the urgent need for an integrative approach to effectively address this global issue, calling for the revision and strengthening of the existing international regulatory framework from a holistic perspective.

KEYWORDS Space debris, international environmental law, spatial sustainability, space environmental impact.

Introducción

Este artículo de revisión aborda la problemática asociada a la falta de mecanismos de gestión en el derecho internacional respecto a los desechos espaciales generados en el espacio ultraterrestre. Su objetivo es evaluar si la generación de dichos residuos espaciales puede considerarse como una amenaza a la sostenibilidad ambiental, económica y social en la interacción espacio-Tierra. Por lo tanto, la identificación de los desafíos de esta problemática en el marco del derecho internacional constituye un aporte al desarrollo del concepto de sostenibilidad del planeta Tierra y el espacio ultraterrestre.

El artículo se estructura en tres secciones principales. La primera aborda la conceptualización de los desechos y la sostenibilidad espacial, estableciendo un marco teórico para el análisis. La segunda realiza una aproximación a los desafíos ambientales, económicos y sociales para la sostenibilidad a mediano y largo plazo que resultan del crecimiento exponencial de los desechos espaciales. Finalmente, la tercera sección identifica los vacíos en el derecho internacional ambiental relacionados con la sostenibilidad y la gestión de residuos espaciales.

¿Dónde inicia el problema?

Esta sección presenta la relación entre el concepto de objeto espacial, desecho y sostenibilidad espacial. En primer lugar, se define el término «objeto espacial» considerando su evolución a nivel internacional. Posteriormente, se examina cómo este concepto ha dado lugar al reconocimiento de los desechos espaciales como una problemática creciente. Finalmente, se analiza el concepto de sostenibilidad desde las perspectivas ambiental, económica y social, estableciendo su conexión con la gestión de los desechos en el entorno espacial.

Objeto espacial

Los tratados internacionales aplicables al derecho del espacio ultraterrestre hacen referencia al término «objetos espaciales». No obstante, ninguno de ellos ofrece una definición precisa de lo que constituye un objeto espacial, limitándose a señalar que incluye las partes de las que están compuestos como su vehículo propulsor (Jerónimo, 2021; González Ferreiro, 2021). Según la literatura y la doctrina, los objetos espaciales se definen como bienes muebles registrables destinados para cumplir una función en el espacio ultraterrestre (Urrea, 2013). Además, según el propósito que cumplan, pueden clasificarse como públicos o privados; según su recorrido, pueden ser orbitales (si recorren una órbita alrededor de la Tierra) o transespaciales (si van de un cuerpo celeste a otro) (Jerónimo, 2021).

De acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), los objetos en el entorno espacial se pueden clasificar en dos grandes categorías: aquellos asociados a un evento de lanzamiento, cuya naturaleza es identificable, y aquellos que no se pueden categorizar.¹ Según esta clasificación, se identifica que existen objetos espaciales con una misión y en funcionamiento, así como objetos sin un propósito específico, considerados desechos espaciales. Siendo estos últimos el punto de partida para el análisis de este artículo.

En este contexto, en un primer acercamiento a los tratados internacionales, se evidencia que estos instrumentos ofrecen una descripción insuficiente y parcial del concepto de objetos espaciales y, como asegura González Ferreiro (2021), el derecho internacional del espacio no proporciona una definición explícita de lo que es un residuo o desecho espacial.

1. ESA Space Debris Office, «ESA's annual space environment report 2022», 2023, disponible en <https://tipg.link/SMCn>.

Una amenaza creciente: Los desechos espaciales

En esta sección del artículo se proporciona una definición de los desechos espaciales desde el ámbito internacional, teniendo en cuenta los países que han abordado este tema, así como la literatura especializada. De esta manera, se exploran las definiciones existentes y se examina cómo los diversos expertos en la materia han conceptualizado los desechos espaciales.

Delgado-Martínez y Álvarez-León (2018) y Hutagalung y otros (2020) afirman que el concepto de desechos espaciales surge con el lanzamiento del primer satélite espacial *Sputnik 1* por parte de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas en 1957.² Posteriormente, en 1961, la NASA reportó en el Archivo de Coordinación de Datos de Ciencia Espacial el primer registro de desechos espaciales: el desprendimiento de las etapas del cohete Ablestar, que puso en órbita al satélite Transit 4A.³

En el año 1999, el Comité de las Naciones Unidas sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (Uncopuos) definió los desechos espaciales como «todos los objetos artificiales, incluidos sus fragmentos y los elementos de esos fragmentos, que están en órbita terrestre o que reingresan a la atmósfera y que no son funcionales» (Iannini Martínez, 2012). Esta definición fue incorporada en las Directrices de Reducción de desechos espaciales en el 2002, un documento no vinculante emitido por Uncopuos y aprobado en el año 2008 por resolución de la Asamblea General (A/RES/62/217). Esta definición también fue adoptada en el Código de Conducta Europeo sobre Mitigación de Desechos Espaciales y, como resultado, incentivó su inclusión en el derecho interno de diferentes países con actividad espacial (González Ferreiro, 2021).

En segundo término, la NASA define los desechos orbitales como cualquier objeto fabricado por el ser humano que se encuentran en órbita alrededor de la Tierra, pero que ya no cumple una función útil o ha finalizado su vida operativa. Dichos desechos incluyen naves espaciales que no funcionan, etapas de vehículos de lanzamiento abandonados, desechos relacionados con misiones y desechos de fragmentación.⁴ En tercer lugar, en la revisión de literatura se encuentra que los desechos espaciales se definen como elementos que orbitan la Tierra y varían en diferentes geometrías y masas, representando un problema significativo para las misiones espaciales actuales y futuras (Shan y Shi, 2022; Tomizaki y otros, 2021; Usovik, 2024). Según autores como Galdámez Ballester y Ramón Fernández (2021) y Jerónimo (2021), estos objetos

2. Véase también Thomas Dale Bess, «Mass distribution of orbiting man-made space debris». *NASA Technical Note*, 1975, disponible en <https://tipg.link/SMMh>.

3. NASA, «Space Science Data Coordinated Archive», 2016, disponible en <https://tipg.link/SMD8>.

4. Mark García, «Space debris and human spacecraft», *Brewminate: A Bold Blend of News and Ideas*, 2021, disponible en <https://tipg.link/SMNM>.

espaciales incluyen aquellos que han concluido su misión y han sido abandonados o perdidos durante las fases de lanzamiento o posicionamiento en órbita.

Por otro lado, la literatura hace énfasis en el concepto de «desechos de segunda generación», referido a las pequeñas partículas generadas como consecuencia del impacto entre objetos espaciales, siendo esta una de las principales causas de la generación de desechos espaciales (Palazón, 2018).

Con base en su procedencia, se establece la clasificación y causas de generación de los desechos espaciales:

- Residuos fragmentados: Generados por colisiones entre dos objetos espaciales artificiales o entre desechos y objetos espaciales, así como las ocasionadas entre desechos espaciales (Catalá, 2022), o generados por la explosión de tanques de combustible, explosiones intencionadas o accidentales, o por el impacto de meteoritos (Nazarenko y Usovik, 2022; Simón y otros, 2013).
- Residuos operacionales: Corresponden a la ejecución de actividades espaciales rutinarias que incluyen los desechos que se liberan durante la fase de lanzamiento, así como la fragmentación de los satélites fuera de servicio, las explosiones de los propulsores de los cohetes y sus residuos (Wright, 2007), el mal funcionamiento o deterioro de los satélites, la falta de recuperación al final de su vida útil o al abandono intencional y accidental de equipos y piezas (Palazón, 2018; Simón y otros, 2013).
- Residuos micro particulados: Gases y partículas que provienen del uso de combustible de los motores de los cohetes, de objetos en órbita y de vehículos tripulados (González Ferreiro, 2021).
- Cargas útiles inactivas: Objetos espaciales que, tras finalizar su misión, pueden permanecer y continuar en órbita terrestre (González Ferreiro, 2021).

Por lo anterior, Miraux (2022) señala que los desechos espaciales representan una gran amenaza para la sostenibilidad de las actividades espaciales a largo plazo. Esto se debe a que su acumulación continuará incrementándose, incluso sin nuevos lanzamientos o misiones espaciales adicionales, lo que podría exceder la capacidad de carga del ecosistema de la órbita terrestre baja o *low earth-orbit* (LEO). Esta capacidad se define como el número máximo de satélites que pueden coexistir de manera sostenible en órbita.

A la fecha no existe un consenso para la definición de desecho espacial, lo que genera incertidumbre en el establecimiento y aplicación de obligaciones a los Estados que participan en actividades espaciales en lo que respecta a su control, seguimiento y gestión. Además, los tratados internacionales no ofrecen una definición concreta del concepto. Según Sheer y otros (2023), el marco legal ha ignorado en gran medida el establecimiento de principios para determinar cuándo un objeto puede calificarse

como desecho espacial. Asimismo, la solidaridad global y los acuerdos internacionales no han abordado explícitamente los impactos asociados a esta problemática.

Por tanto, en este artículo se identifican las características de un desecho espacial de la siguiente forma: i) son objetos artificiales que se encuentran en órbita terrestre y no están en funcionamiento; ii) su generación está correlacionada con el aumento de la actividad espacial y el incremento de objetos espaciales enviados a órbita; iii) pueden generarse a causa de diferentes situaciones operacionales (lanzamiento o puesta en órbita), accidentales (colisiones, explosiones) o deliberadas (pruebas antisatélite, actividades militares contra espaciales); y iv) representan una amenaza significativa para la sostenibilidad espacial.

La sostenibilidad espacial: Una prioridad reconocida

Este artículo identifica y discute los principales desafíos de sostenibilidad para las actividades espaciales presentes y futuras, resaltando la necesidad de conceptualizar qué se entiende por sostenibilidad espacial y establecer su relación directa con la gestión de los desechos espaciales. Para esto, en primer lugar, se presentan los datos sobre el incremento de los desechos espaciales; luego, se analiza la teoría de Donald Kessler sobre el incremento exponencial de dichos desechos; y, finalmente, se explora el concepto de sostenibilidad espacial según los organismos internacionales y la literatura especializada.

Desde el inicio de la actividad espacial, la cantidad de desechos en la órbita de la Tierra ha superado a los satélites en operación. En el siglo XXI se ha incrementado el lanzamiento de objetos a dicha órbita y, para el año 2020 ya habían más de treinta mil piezas de basura espacial en este entorno.⁵ Así como ha ocurrido actualmente con la crisis climática, a partir de la década de 1970, los expertos espaciales han estado advirtiendo sobre los peligros de la proliferación descontrolada de desechos y la congestión orbital (Byers, 2022).

En 1978, Donald Kessler postuló una teoría sobre el impacto acumulativo de los desechos espaciales, a través de colisiones y explosiones en órbita, que podría conducir a un aumento exponencial en la cantidad de objetos artificiales en el espacio (Kessler y Cour-Palais, 1978). Conocida como el síndrome de Kessler, esta teoría plantea que la cantidad de objetos en la órbita de la Tierra puede llegar a ser tan masiva que estos objetos pueden chocar con los desechos espaciales y generar a su vez más residuos.

Teniendo en cuenta la teoría de Kessler, este artículo plantea que el incremento de desechos espaciales y la incertidumbre existente frente al riesgo de su colisión con

5. ESA Space Debris Office, «ESA's annual space environment report 2022», 2023, disponible en <https://tipg.link/SMCn>.

objetos espaciales en funcionamiento, inactivos o incluso con otros desechos espaciales representa riesgos significativos a la sostenibilidad de las actividades espaciales a largo plazo (incluyendo los proyectos comerciales y económicos que se planean a futuro en esta materia). Por tanto, la problemática de la generación y el crecimiento exponencial de desechos espaciales, junto con la intensificación de las actividades espaciales, representa una de las principales amenazas para la sostenibilidad espacial.

En 2018, Uncopuos definió la sostenibilidad de las actividades en el espacio ultraterrestre identificando los siguientes elementos: i) la capacidad de efectuar las actividades espaciales indefinidamente en el futuro; ii) el logro de los objetivos de acceso equitativo a la exploración y utilización del espacio ultraterrestre; iii) la satisfacción de necesidades de las generaciones presentes y futuras del medioambiente del espacio ultraterrestre; iv) la preservación de este recurso para las generaciones futuras, manteniendo los fines pacíficos según los tratados objeto del presente estudio (A/AC.105/L.315).

En su 58.º periodo de Sesiones de la Asamblea General de las Naciones Unidas en el 2019, en el *Informe de la Subcomisión de Asuntos Jurídicos*, se expresó que es necesario preservar el espacio ultraterrestre para las generaciones futuras. Se destacó que garantizar el acceso a la utilización y desarrollo de tecnologías espaciales es esencial para la sostenibilidad a largo plazo (A/AC.105/1203).

Bajo un contexto histórico, se evidencia que la incorporación de la sostenibilidad espacial en la agenda internacional ha sido un proceso complejo (Martínez, 2021). Fue a partir del año 2018 (en el encuentro de UNISPACE+50 realizado con ocasión de la celebración del cincuentenario de la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Exploración del Espacio Ultraterrestre) cuando se habló sobre la evaluación de las actividades espaciales como un motor del *desarrollo sostenible* (De Faramiñán Gilbert, 2021).

En este sentido, cabe resaltar que debido a la gran extensión del espacio, este se percibe como un recurso infinito; no obstante, tal como afirma Martínez (2021), el entorno espacial orbital de la Tierra es un recurso finito, que cada vez está siendo utilizado en mayor medida por diferentes actores comerciales, estatales, organizaciones intergubernamentales internacionales y no gubernamentales y, que como consecuencia de sus actividades se presenta un riesgo no solo para la seguridad de operaciones espaciales, sino para la sostenibilidad a largo plazo (López Delgado, 2016; Restrepo Salazar y Lemus Romaña, 2018; Jiménez González, 2022; Sánchez Mayorga, 2023). Como consecuencia, el concepto de sostenibilidad espacial surge de comprender que el entorno orbital de la Tierra y el espectro electromagnético son recursos naturales limitados que están bajo una presión progresiva por el crecimiento constante en el número y la diversidad de actores espaciales (Martínez, 2018).

Por lo anterior, este artículo reconoce que la sostenibilidad espacial es una prioridad contemplada en el contexto internacional; no obstante, no se ha comprendido

que el entorno orbital donde se desarrollan las actividades espaciales es un recurso limitado y su uso continuo e insostenible representa una constante amenaza para la misma. Con base en lo expuesto, es necesario identificar los impactos que las actividades espaciales y la generación de desechos espaciales pueden tener sobre la sostenibilidad espacio-Tierra.

Aproximación a los impactos de los desechos espaciales y sus desafíos en la sostenibilidad espacial

Antes de seguir, es necesario recalcar que la sostenibilidad espacial tiene un alcance amplio e incluye no solo aspectos de seguridad espacial y nacional, sino también los impactos ambientales, sociales y económicos que las actividades espaciales y la generación de desechos espaciales pueden tener sobre el planeta Tierra (Undseth, Jolly y Olivari, 2020).

Dimensión ambiental

Debido al crecimiento de las actividades espaciales y el aumento en la generación de desechos espaciales, se presentan a continuación algunos de los principales impactos que estos dos factores representan para la sostenibilidad ambiental del espacio ultraterrestre y la Tierra, de acuerdo con la literatura revisada.

Contaminación de la órbita terrestre

En las etapas iniciales del desarrollo de la órbita geoestacionaria, no se consideró necesario retirar las naves espaciales fuera de servicio. Incluso después de la firma de acuerdos internacionales para la eliminación de estas naves, muchas de ellas nunca fueron trasladadas a órbitas de eliminación debido a razones como fallas en el sistema de control, el suministro de energía o motores, así como falta de fluido de trabajo y el impacto de los desechos espaciales (Nikolichev y Svtina, 2024).

La combinación de estos factores, junto con la corta vida operativa de los objetos, ha dado lugar a la proliferación de desechos espaciales. Estos desechos son reconocidos como un factor de estrés ambiental que impacta el entorno orbital de la Tierra y plantea una amenaza para el acceso futuro al espacio (Maury y otros, 2020b).

En cuanto a la contaminación por desechos orbitales, se considera que la limpieza espacial representa un desafío significativo. Aunque se han desarrollado dispositivos y mecanismos para abordar esta problemática, el proceso sigue siendo tecnológicamente complejo y depende de avances adicionales para su implementación efectiva. Esta limitación impide que el recurso orbital se restaure a su estado original. Por

ejemplo, afirman Popova y Schaus (2018)⁶ que los desechos espaciales que orbitan a más de mil quinientos kilómetros de altitud permanecerán en el espacio durante siglos debido a la insuficiente resistencia atmosférica en esa altitud.

Al respecto, es importante destacar que las amenazas al uso continuo, seguro y sostenible del espacio ultraterrestre, incluyendo el incremento de desechos espaciales en órbita, han experimentado un marcado aumento durante la última década. Este fenómeno ha generado un espacio exterior más congestionado y disputado (Martínez, 2018; Trur, 2021), lo que podría eventualmente provocar escasez de este recurso en el futuro.

En consecuencia, la mayoría de los especialistas involucrados en el problema de la contaminación de la órbita terrestre y el medio ambiente espacial consideran que el estado actual de su contaminación es grave y catastrófico y se acerca constantemente al inicio del síndrome de Kessler y a la escasez del recurso orbital (Wen y otros, 2018; Adushkin y otros, 2020). Al respecto, no son los desechos existentes los que han causado la última razón de preocupación, sino las propuestas para el despliegue de una gran cantidad de nuevas megaconstelaciones de pequeños satélites en LEO en los próximos años (Pelton, 2019; Pardini y Anselmo, 2022; Miraux, 2022).

Además de esto, hay desechos espaciales peligrosos que contienen material tóxico o radiactivo, lo que representa un riesgo adicional debido a la posibilidad de que puedan caer sobre la tierra y contaminar el lugar en el que colisionen. No es un temor injustificado: esta situación ocurrió a causa del satélite soviético Cosmos 954, que se encontraba equipado con un reactor nuclear y en 1978 impactó en Canadá, lo que dio lugar a la indemnización de canadienses afectados por parte de la URSS (Pastor, 2016; Vázquez, 2020).

Contaminación lumínica

Además de amenazar el uso sostenible del entorno espacial, como consecuencia del acelerado proceso de contaminación del espacio cercano a la Tierra por desechos orbitales, se interrumpe el intercambio de luz y calor entre la Tierra, el espacio adyacente y el entorno exterior, debido a que cualquier elemento en órbita terrestre iluminada por el Sol refleja o dispersa la luz (Adushkin y otros, 2020; Tyson y otros, 2020; Kocifaj y otros, 2021).

Este fenómeno tiene diversas implicaciones, tanto para la ciencia como para la sociedad. En primer lugar, el aumento de objetos espaciales, incluidos los desechos, genera un incremento en el brillo artificial, lo que afecta la visibilidad del cielo nocturno, que es patrimonio común de la humanidad y es esencial para realizar estudios

6. Véase también Caleb Henry, «LEO and MEO broadband constellations mega source of consternation», *Space News*, 13 de marzo de 2018, disponible en <https://tipg.link/SMNe>.

precisos y profundos del universo (Hearnshaw, 2024). Estudios recientes estiman que la cantidad de estos objetos orbitando alrededor de la Tierra podría aumentar en un diez por ciento el brillo general del cielo nocturno, superando los niveles naturales y el umbral establecido por los astrónomos hace más de cuarenta años para considerar un lugar contaminado por la luz (Kocifaj y otros, 2021).

Esta creciente contaminación lumínica deteriora las condiciones para la investigación astronómica, afectando la observación de estrellas y comprometiendo la investigación científica, especialmente en los sitios de observación astronómica. Un ejemplo de ello es el lanzamiento de los primeros satélites Starlink de SpaceX, que ha provocado que muchos astrónomos informen sobre las estelas visibles de los satélites, las cuales interfieren con su trabajo (Miraux, 2022). En respuesta, la Unión Astronómica Internacional presentó un informe a la Uncopuos, en el que recomendaba la preservación de «cielos oscuros y tranquilos para la ciencia y la sociedad». En dicho informe, se destacó que los efectos acumulativos de las constelaciones satelitales no han sido adecuadamente investigados y se subrayó que los avances en los descubrimientos astronómicos solo serán posibles si se mantiene el cielo nocturno libre de contaminación (Miraux, 2022).

En segundo lugar, la reducción de la transparencia del espacio cercano a la Tierra y la atmósfera altera el intercambio de luz y calor entre la Tierra y el espacio que se ha desarrollado durante miles de millones de años, generando daños ambientales, particularmente cambios significativos en la capa de ozono (Adushkin y otros, 2020).

En tercer lugar, se ha comprobado que la contaminación lumínica tiene efectos biológicos nocivos en el comportamiento, los ciclos de vida, la reproducción, la migración, la supervivencia y la salud de la vida silvestre, así como sobre la biodiversidad, los ecosistemas y los servicios ecosistémicos (Rich y Longcore, 2013; Bennie y otros, 2016; Irwin, 2018; Gaston y otros, 2023). Además, existe evidencia de que diversas especies, como insectos, aves migratorias nocturnas y mamíferos, utilizan la orientación estelar para su navegación (Foster y otros, 2018).

Capa de ozono, emisiones y cambio climático

Las actividades espaciales son las únicas responsables de las emisiones directas de fuente antropogénica dentro de la capa de ozono (Maury y otros, 2020b). Debido a la combustión de los motores de los cohetes, se generan emisiones de gases y partículas que, al pasar a la estratosfera donde se encuentra la capa de ozono, pueden agotar el ozono, alterar el equilibrio de la atmósfera y contaminar el medio ambiente espacial de forma peligrosa.

Al emitir productos de combustión directamente en la estratosfera y en altitudes superiores, los lanzamientos y reingresos de cohetes son preocupantes, debido a que el noventa por ciento del ozono atmosférico se encuentra en la estratosfera, con las

concentraciones más elevadas en la capa de ozono. Este ozono estratosférico actúa como una protección natural para la Tierra al absorber la mayor parte de la radiación ultravioleta procedente del Sol, la cual resulta perjudicial para la vida (Sirieys y otros, 2022).

Según Chanoine,⁷ el impacto ambiental de los objetos espaciales ocurre durante su lanzamiento. Aunque la contribución actual de los cohetes a la pérdida de ozono es relativamente pequeña, este factor sigue siendo relevante y debe recibir mayor atención debido al creciente aumento de la actividad espacial. En este contexto, es fundamental que el derecho internacional contemple la regulación necesaria para abordar los compuestos de escape de los cohetes, en aras de proteger la capa de ozono, ya que, si no se regulan, para 2050 las emisiones de los cohetes podrían agotar el ozono más de lo que lo hicieron las SAO (Ross, Peinemann y Ross, 2009).⁸

De acuerdo con Dallas y otros (2020), también se generan emisiones durante el reingreso de desechos espaciales a la atmósfera, debido a su descomposición. En este proceso de desorbitación al final de su vida útil, se introducen materiales en la atmósfera superior, la mayoría de los cuales contienen aluminio (Schulz y Glassmeier, 2021). Este fenómeno ha generado preocupación, ya que podría afectar la capa de ozono y, dependiendo del tiempo de residencia en la atmósfera, alterar el albedo de la Tierra (Boley y Byers, 2021).

Al respecto, la investigación sobre el clima espacial aún está en una etapa inicial (Undseth, Jolly y Olivari, 2020), por lo que todavía no se comprende completamente el impacto que pueden tener en él los objetos y desechos espaciales, así como sus emisiones. No obstante, la literatura sugiere que contribuyen al cambio climático, un aspecto que aún no está regulado (Adushkin y otros, 2020).⁹

Agotamiento de recursos naturales e impactos en el ciclo de vida

A lo largo del ciclo de vida de las misiones espaciales, que comprende desde la fabricación de los satélites hasta la operación y el final de su vida útil, se generan diversos impactos ambientales. A continuación, se detallan los principales impactos identificados en cada una de las fases mencionadas anteriormente (Maury y otros, 2017; 2019; 2020b; 2020a):

7. Augustin Chanoine, «Environmental impacts of launchers and space missions». *Clean Space Industrial Days*, 25 de octubre de 2017, disponible en <https://tipg.link/SMMn>.

8. La sigla significa, literalmente, «sustancias que agotan la capa de ozono» y se usa para referir a todos aquellos compuestos químicos que reducen la concentración de ozono en la estratosfera.

9. Véase también Martin Ross y James Veda, «The policy and science of rocket emissions», Center for Space Policy and Strategy, The Aerospace Corporation, 2018, disponible en <https://tipg.link/SMPC>.

- Diseño, producción, ensamblaje y pruebas: Durante esta etapa se registra un consumo significativo de electricidad y gas natural, así como el agotamiento de recursos minerales debido a los materiales utilizados en la construcción de los satélites.
- Uso del objeto espacial: Esta fase representa aproximadamente del veinticinco al treinta y cinco por ciento de los impactos ambientales totales, e incluye el potencial de generación de desechos espaciales. Durante esta etapa, el consumo de electricidad y combustibles fósiles son los aspectos ambientales más destacados que contribuyen al calentamiento global. Además, muchos objetos espaciales utilizan hidracina como combustible, el cual tiene un alto potencial de toxicidad para los seres humanos y genera una cantidad significativa de emisiones de dióxido de carbono (Maury y otros, 2019; 2020b).
- Fin de vida útil: Al llegar al final de su vida útil, los satélites y otros objetos espaciales se convierten en desechos espaciales. Este proceso contribuye al aumento de los residuos espaciales en órbita, lo que puede representar un riesgo adicional para la seguridad de las futuras misiones espaciales y la sostenibilidad del entorno orbital terrestre, además de los demás impactos señalados en este artículo.

Daños en satélites usados con fines ambientales

La mayor parte de los desechos espaciales se encuentra en la órbita geoestacionaria LEO. La pérdida de espacio en esta región por la congestión de este tipo de objetos puede generar daños en satélites útiles a nivel medioambiental, los cuales son utilizados para servicios de vigilancia en temas meteorológicos, alerta temprana, toma de decisiones para mitigación y adaptación al cambio climático, monitoreo de gases de efecto invernadero, entre otros (Miroux, 2022).¹⁰

Con base en lo expuesto, según el criterio de las autoras de este artículo y aunado a conclusiones de la literatura especializada, las consecuencias de los desechos espaciales en diversos componentes y desde varios frentes ambientales amenazan la sostenibilidad de las actividades espaciales y representan la pérdida irremediable y futura del acceso y uso de un recurso finito, limitado y crucial para el planeta: el recurso orbital. En concordancia con esto, la siguiente parte del artículo expone los impactos socioeconómicos derivados de esta revisión.

10. Véase también Diana Marina Rodríguez y Luciano Vidal, «Satélites ambientales para el monitoreo de gases de efecto invernadero», Nota técnica SMN 2021-92, Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, disponible en <https://tipg.link/SMPT>.

Dimensión económica

Las discusiones sobre la perspectiva económica empezaron a la par de la definición de sostenibilidad espacial, entendida en pocos términos como la no afectación negativa del uso actual del espacio para asegurar su exploración y utilización en el futuro. Los autores mencionados en este fragmento acuerdan que, desde la perspectiva económica, el espacio es un bien común global, en tanto un recurso finito o creado por el hombre se considera recurso de uso común (Ostrom, 2010).

En este sentido, especifican autores como Migaud (2020) y Undseth, Jolly y Olivari (2020) que las órbitas de la Tierra y el espectro electromagnético son recursos comunes de la humanidad. Así, ambos comparten un dos características esenciales: son bienes no excluibles y también bienes rivales (Adilov y otros, 2020). Undseth, Jolly y Olivari (2020) explican estos conceptos: que sea un bien no excluible significa que tiene un bajo nivel de exclusividad, es decir, que evita que un actor individual pueda establecer control sobre los recursos; y que sea un bien rival se explica con que la alta sustracción de uso por parte de un actor le resta valor a la cantidad de dicho recurso disponible para otros.

Por lo anterior, en criterio de las autoras, la desigualdad y limitación futura en el acceso a esos recursos comunes demanda la necesidad de construir herramientas y mecanismos de gestión sostenible del uso orbital con la cooperación de diferentes actores, sectores y regiones. En consecuencia, esta gestión no debe obedecer a patrones de exclusividad y capacidad de control por parte de los diferentes actores, sino que debe responder al carácter común de los recursos espaciales, asegurando un acceso equitativo para todos.

Al respecto, Palmroth y otros (2021) plantean que la gestión sostenible de dichos recursos comunes se puede reflejar desde dos puntos de vista. En primer lugar, la gestión de la capacidad operativa, entendida como la comprensión de las limitaciones de los diferentes recursos utilizados, según la cual se debe establecer y acordar la capacidad efectiva de cualquier operación con el fin de que esta responda a requisitos de demanda específicos. Y segundo, la gestión de la capacidad dentro del fondo común de recursos, que afirma que, si los actores involucrados en las actividades espaciales reconocen el carácter de recurso común de las órbitas, pueden considerar la gestión desde los niveles de capacidad y las adiciones futuras a la capacidad predeterminada, lo que a su vez permitiría conocer las restricciones del uso de los recursos naturales.

Adicionalmente, esta gestión sostenible necesita de consenso y cooperación, con el fin de establecer distribuciones de espacio, de beneficio y de ganancia, o de llegar a un conjunto de reglas de asignación (Chrysaki, 2020; Palmroth y otros, 2021; Martínez, 2023). Palmroth y otros (2021) enumeran cuatro elementos clave de la gestión del uso sostenible del espacio desde la perspectiva económica: i) reconocer el principio de sostenibilidad económica y características como la maximización de capacida-

des; ii) Reconocer los efectos externos de los desechos espaciales y los efectos en la disminución del espacio orbital utilizable causado por el incremento en volumen y composición de dichos desechos; iii) operacionalizar el espacio orbital sostenible de acuerdo con diferentes propiedades técnicas como la vida útil y la potencialidad de desecho, mediante la cuantificación del número máximo permitido de satélites en funcionamiento por periodo; y, por último, iv) operacionalizar los efectos externos, evaluando los costos de los desechos causados por los límites en el espacio y de daños por colisión con satélites en funcionamiento.

Autores como Adilov y otros (2019 y 2020), Rao y otros (2020) y Martínez (2023) han presentado al problema de los desechos espaciales como parte de la dimensión económica de la gestión sostenible del espacio (un recurso de uso común). Por su parte, Adilov y otros (2018) abordan la discusión construyendo un modelo dinámico de desechos orbitales que denominan «síndrome de Kessler económico». Específicamente, este modelo predice, primero, que la cantidad de desechos espaciales aumentará incluso en ausencia de nuevos lanzamientos de satélites cuando la medida de deterioro orbital es relativamente baja y, segundo, que las tasas de lanzamiento responden de manera no monótona a los desechos: a niveles bajos de escombros la relación es positiva y creciente y, en niveles altos hay un punto de inflexión más allá del cual los lanzamientos se contraen a medida que los escombros continúan acumulándose (Adilov y otros, 2018).

El síndrome de Kessler económico sugiere que los desechos orbitales hacen que las órbitas no sean rentables económicamente y, aunque se inspira en el síndrome de Kessler, difiere en que, a medida que aumente la cantidad de desechos, el espacio puede volverse económicamente no rentable antes de que se vuelva físicamente inutilizable como lo expone Kessler en la teoría previamente mencionada.

Desde la dimensión económica, la sostenibilidad espacial también se enfrenta con el reto de las actividades de digitalización de empresas con fines comerciales, civiles y militares: el despliegue de mega constelaciones y aumento de satélites en operación. Undseth, Jolly y Olivari (2020) mencionan que, debido a los menores costos de lanzamiento y altos rendimientos, las actividades en LEO han aumentado significativamente en los últimos años; así, reportan un listado de actividades desde el 2018 por parte de SpaceX, Amazon y OneWeb en el lanzamiento de satélites y despliegue de constelaciones aprobados por la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos.

La gestión sostenible de las órbitas, respecto al uso, disposición y despliegue, puede tomar varias formas. Rao y otros (2020) mencionan que las soluciones propuestas para resolver el problema de los desechos espaciales son principalmente tecnológicas y sugiere que abordarlas desde los incentivos podría resultar más eficiente, debido a que los satélites se lanzan sin tener en cuenta los riesgos de colisión. Por lo anterior, proponen una «tarifa de uso orbital» (OUF, por sus siglas en inglés) para ser acogida internacionalmente, a partir de un modelo inspirado en los impuestos al carbono.

Así mismo, Adilov y otros (2019 y 2020) mencionan enfoques basados en precios. Con base en simulaciones, proponen un marco de inversión dinámico que, para limpiar el espacio de escombros, combine la remoción activa con una política de mitigación; y, para evitar la colisión y generación de más desechos espaciales cuando se hacen colocación de satélites geoestacionarios, proponen modelar la elección de las empresas y hacer más eficiente las ranuras orbitales como los satélites ya puestos allí, mediante incentivos que, a su vez, los harían utilizar al máximo los recursos orbitales ya dispuestos en vez de generar más.

Así mismo, Chrysaki (2020) evaluó el problema que presenta la sostenibilidad espacial basado en las elecciones individuales de las empresas. Por esto, presenta un código de conducta voluntario para la industria espacial basado en el concepto de no dañar, respaldado por el principio de intervención y complementado por un mecanismo de cumplimiento. Este código de conducta deberá ser adoptado por las empresas e industrias privadas, lo que mejoraría el posicionamiento y reputación de las empresas con actividad espacial. Además, con esta herramienta, la implementación del principio de sostenibilidad estará completamente integrada en las actividades espaciales realizadas por las empresas.

En efecto, autores y entidades como NASA y ESA, reconocen públicamente que los desechos espaciales imponen altos costos a las economías espaciales (Zhu, 2022). Dentro del panorama actual y futuro del impacto económico de los desechos espaciales, se encuentran las siguientes consecuencias: i) pérdida de satélites completos y fallas de misiones espaciales; ii) incremento en el costo de misiones espaciales; iii) costos asociados a las actividades de vigilancia y ejecución de maniobras para evitar su colisión; iv) pérdida de las observaciones de satélites activos y daños en la Estación Espacial Internacional; y v) reducción del crecimiento económico y desaceleración de las inversiones en el sector (Undseth, Jolly y Olivari, 2020; Maury y otros, 2020b).

En síntesis, en este artículo se identifica que en materia económica los impactos generados a causa de los desechos espaciales se pueden ver reflejados en pérdidas directas e indirectas para todos los actores, sectores y regiones involucrados o beneficiados por la actividad espacial. Por consiguiente, se considera que estos aspectos económicos impactarán de forma directa a la sociedad.

Dimensión social

Como se mencionó previamente en la revisión del impacto ambiental, la falta de gestión de estos objetos en el recurso orbital afecta a los servicios de vigilancia climatológicos. En particular causan afectaciones o pérdidas frente a la predicción meteorológica, la vigilancia del clima e investigación sobre el cambio climático, las ciencias de la tierra y las comunicaciones por satélite basadas en las observaciones del espacio (Undseth, Jolly y Olivari, 2020; Hearnshaw, 2024).

Por lo anterior, Undseth, Jolly y Olivari (2020) concluyen que este fenómeno, en primer lugar, crea afectaciones desproporcionadas a ciertas áreas geográficas y grupos sociales, en específico en zonas rurales con infraestructuras terrestres limitadas y con gran dependencia de la infraestructura espacial. En segundo lugar, la autogeneración de desechos espaciales puede ser irreversible, lo cual perturbaría a algunas órbitas con gran importancia socioeconómica, que podrían quedar inutilizables para las generaciones futuras.

Concretamente, considerando las circunstancias en las que el mundo se ha visto recientemente afectado como consecuencia de la pandemia originada por el covid-19, afirma De Faramiñán Gilbert (2021) que, por medio de la tecnología espacial como la tele epidemiología, los programas de teledetección de la Tierra pueden ayudar a disminuir los efectos de una pandemia con actividades de seguimiento, preparación y respuesta. Frente a esto, el Programa de Observación de la Tierra de la ESA ha indicado que a pesar de que la agencia no está preparada para ayudar a pronosticar la progresión del virus, se reciben datos de algunos de los satélites de alta gama y nuevas tecnologías de inteligencia artificial que pueden ser utilizadas para comprender y controlar los cambios sociales asociados a este (Aschbach, 2020).

En este contexto, los desechos y, en general, las actividades espaciales pueden acarrear diferentes consecuencias graves e inminentes en materia ambiental, económica y social para la sostenibilidad espacio-Tierra, por lo que es necesario validar que estos aspectos se encuentren abordados dentro del derecho internacional ambiental.

El dilema de los desechos espaciales en el derecho internacional bajo una perspectiva de sostenibilidad

A continuación, se realiza una revisión de los instrumentos del derecho internacional del espacio ultraterrestre, En primer lugar, se revisarán los instrumentos vinculantes, es decir, los tratados internacionales y, posteriormente, se abordarán los instrumentos no vinculantes.

Tratados internacionales

Los cinco tratados del espacio que han entrado en vigor a la fecha y que, según varios autores (De Faramiñán Gilbert, 2021; Jerónimo, 2021; Rey Mora, 2021; Jiménez González, 2022), conforman el Corpus Iuris Spatialis y representan la estructura jurídica que garantiza una cooperación internacional entre los Estados en la exploración del espacio ultraterrestre con fines pacíficos son: el Tratado sobre el espacio Ultraterrestre, el Acuerdo sobre Salvamento, el Convenio sobre Responsabilidad, el Convenio sobre el Registro, y el Acuerdo de la Luna. A saber, estos tratados se han desarrollado alrededor de cuatro principios: i) la no apropiación del espacio ultraterrestre, la Luna

y otros cuerpos celestes; ii) el beneficio para toda la humanidad como resultado de las actividades espaciales; iii) la cooperación internacional; y iv) el uso pacífico del espacio exterior (Álvarez Calderón y otros, 2020).

A continuación, se dará una introducción al contenido de los tratados y una revisión, teniendo como componentes principales la búsqueda de una definición o un acercamiento al concepto de desecho espacial, si contiene medidas de gestión o manejo, si contiene un mecanismo que permita hacer efectivo el cumplimiento de las obligaciones adquiridas en el tratado y si contiene perspectivas de sostenibilidad espacial.

Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre

El Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes (Resolución 2222 [XXI] de la Asamblea General), conocido como Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre (OST, por sus siglas en inglés), entró en vigor el 10 de octubre de 1967. De acuerdo con Galdámez Ballester y Ramón Fernández (2021), este tratado es considerado la carta magna del espacio y proporciona la base jurídica para la exploración y utilización del espacio y un marco para el desarrollo del derecho del espacio ultraterrestre.

Los temas abordados en este tratado se refieren a la tensión existente entre las naciones desarrolladas que tienen actividad espacial y las que no la tienen (Prasad, 2019), enfocándose así en la no apropiación del espacio ultraterrestre y en evitar poner en órbita armas nucleares o de destrucción en masa que constituyen una amenaza para la humanidad (Vázquez, 2020).

Entre tanto, en la redacción de este tratado se identifica la preocupación de los usos militares y no militares del espacio exterior, y se resalta el enfoque en el uso pacífico del mismo para su no reclamación de soberanía (Prasad, 2019). Así mismo, el OST impone una obligación imprecisa a los Estados de autorizar y supervisar continuamente las actividades espaciales no gubernamentales bajo su jurisdicción, lo que refleja la necesidad de incluir que los Estados se comprometan a realizar un estudio de impacto ambiental sobre las actividades asociadas al lanzamiento del objeto espacial (Erhart y Boutovitskai, 2021).

Aunque el tratado tiene aspectos positivos como reforzar su utilización pacífica o favorecer la igualdad entre los Estados para su exploración y utilización, estos aspectos se han visto marginados debido a las pocas ratificaciones que ha tenido (De Faramiñán Gilbert, 2020). Adicionalmente, no aborda la preservación del ambiente espacial ni establece expresamente obligaciones y sanciones a los Estados parte.¹¹ En

11. Marta Gaggero, «La sostenibilidad de las actividades espaciales aspectos jurídicos de los desechos espaciales», *Curso de formación IILA/RECYT Mercosur*, 2021, disponible en <https://tipg.link/SMNL>.

consideración, únicamente hace un acercamiento inconcluso frente a cuestiones ambientales, pues solo enuncia que los Estados parte deben evitar la contaminación nociva del medioambiente del espacio exterior y los cambios adversos en el medioambiente de la Tierra a causa de la introducción de material extraterrestre (Álvarez Calderón y otros, 2020).

De la misma forma, este tratado reitera que los Estados Parte explorarían el espacio exterior «de conformidad con el derecho internacional, incluida la Carta de las Naciones Unidas», lo cual significa que los diversos desarrollos contextuales en el campo del derecho internacional deberían aplicarse al espacio ultraterrestre, incluyendo el concepto de desarrollo sostenible (Prasad, 2019). Además, este tratado se redactó cuando el número de naciones que viajaban por el espacio eran mínimas, lo cual sigue siendo muy general para las operaciones espaciales actuales y futuras en relación con el creciente número de satélites enviados a órbita terrestre (Plattard y Smith, 2021). Por tanto, en opinión de las autoras, este tratado no aborda aspectos ambientales y posee un lenguaje aspiracional respecto a la generación de desechos espaciales, sin definirlos, ya que su importancia no fue contemplada.

Aunque el OST aborda las preocupaciones de la regulación de los desechos orbitales en cuanto a quién es responsable de su generación y cómo se puede prevenir la creación de más, no establece de manera práctica estas preocupaciones y las medidas se quedan cortas en la actualidad. Por lo anterior, se identifica que no cuenta con medidas de gestión concretas ni con un organismo competente para dar seguimiento a lo acordado en el tratado. De otra parte, el OST no considera las medidas de gestión para el acceso y uso de las órbitas espaciales ni el aumento de actores no estatales que realizan actividades espaciales, motivo por el cual se concluye que no denota un compromiso tangible frente a la sostenibilidad espacial.

Acuerdo sobre Salvamento

El Acuerdo sobre el Salvamento y la Devolución de Astronautas y la Restitución de Objetos Lanzados al Espacio Ultraterrestre (Resolución 2345 [XXII] de la Asamblea General; en adelante Acuerdo sobre Salvamento) entró en vigor el 3 de diciembre de 1968. Indica que los Estados parte tienen responsabilidad de devolver al astronauta y ayudar al Estado de lanzamiento a encontrar y recuperar el objeto espacial que ha regresado a la Tierra y ha aterrizado fuera del Estado de lanzamiento, siguiendo al principio de cooperación internacional, el cual es un principio subyacente al concepto de desarrollo sostenible (Prasad, 2019).

Por su parte, el acuerdo no hace referencia a los beneficios o manejo de personas que no sean precisamente astronautas y que se dirijan al espacio (como es el caso reciente de los turistas espaciales) (Tronchetti, 2013) ni a quienes podrían verse afectados por los impactos señalados en materia ambiental, económica y social previa-

mente mencionados en este artículo. En consecuencia, el Acuerdo sobre Salvamiento no resulta relevante para los desechos espaciales, debido a que se centra en la vida y salud de los astronautas. Por ello, no cuenta con una definición de desecho espacial y las medidas de gestión redactadas se centran en el control, asistencia y ayuda a la tripulación espacial. Por consiguiente, aunque el acuerdo habla del rescate de los objetos espaciales, sus partes y componentes que han vuelto a la Tierra, el acuerdo no precisa la definición de dichos objetos espaciales ni se definen lineamientos específicos para el manejo de este tipo de residuos en la superficie terrestre.

Además, no cuenta con un organismo que se haga cargo de hacer seguimiento al cumplimiento de las obligaciones. A pesar de que menciona la necesidad de cooperar, este apoyo entre Estados se da en los casos en que los objetos han llegado a la Tierra o un astronauta requiere de ayuda, por lo que no ahonda en la realización de actividades espaciales a partir de principios de sostenibilidad.

Convenio sobre Responsabilidad

El Convenio sobre la Responsabilidad Internacional por Daños Causados por Objetos Espaciales (Resolución 2777 [XXVI] de la Asamblea General), conocido como Convenio de Responsabilidad (ILD, por sus siglas en inglés), entró en vigor el 11 de septiembre de 1972. Estipula que los Estados parte deben mantener un reporte en el que registren los detalles de lanzamiento de los objetos espaciales. Es decir, declara a los Estados responsables por daños en la Tierra causados por objetos espaciales lanzados al espacio (Button, 2012). En él, se define objeto espacial como «las partes componentes de un objeto espacial, así como el vehículo propulsor y sus partes», una definición bastante amplia que podría abarcar los desechos espaciales, sin ser lo suficientemente específica.

En virtud del convenio, para que surja la responsabilidad deben concurrir tres elementos: se debe producir un daño que pueda ser comprobado, debe existir una relación directa entre el daño causado y el objeto espacial que lo produjo, y el objeto espacial debe estar relacionado con un Estado lanzador, que será el responsable, según las disposiciones del convenio. Así, el convenio establece dos regímenes de responsabilidad. En el artículo 2, uno primero donde hay responsabilidad absoluta (u objetiva) por los daños causados en la superficie terrestre o aeronaves en vuelo. En este, basta con constatar la existencia de un daño y establecer un nexo causal entre el objeto espacial y el daño causado para que surja responsabilidad. En artículo 3, se introduce la responsabilidad por culpa, para los daños causados en lugares diferentes a la superficie de la Tierra. En este caso, el Estado afectado debe probar la culpa o negligencia del Estado lanzador.

Este instrumento crea un organismo de gestión llamado Comisión de Reclamaciones que serviría de mecanismo de cumplimiento de las obligaciones señaladas en

el convenio: indemnización por parte del Estado lanzador por daños causados en la Tierra. No obstante, se excluyen los daños causados por desechos espaciales de su ámbito de aplicación, porque se considera que están fuera del control de los Estados (Álvarez Calderón y otros, 2020), y no prevé los daños medioambientales al espacio ultraterrestre concretamente (Jiménez González, 2022).

De acuerdo con los criterios de revisión propuestos en este artículo, el ILD intenta establecer medidas de responsabilidad por daños causados por objetivos espaciales al pedir a los Estados determinar quién es el propietario del objeto espacial. La redacción del convenio refleja un marco jurídico diseñado para un contexto en el que las actividades espaciales estaban dominadas por Estados, sin prever la creciente participación de actores privados ni las consecuencias acumulativas de estas actividades.

Si bien el convenio no cuenta con medidas de gestión respecto a los desechos espaciales, el requerimiento de determinar la propiedad de los objetos espaciales (necesario para establecer la responsabilidad) plantea un dilema. Por un lado, este requisito refuerza el principio de quien contamina paga, alineándose al concepto de desarrollo sostenible (Prasad, 2019). Por otro lado, podría limitar futuras acciones tecnológicas destinadas a eliminar los desechos, ya que cualquier intervención requeriría determinar y atribuir propiedad. Así, en este artículo se considera que este convenio falla en dictar medidas que aborden los desafíos contemporáneos, pues su enfoque en los efectos de los lanzamientos sobre la Tierra no aborda las dimensiones ambientales, económicas y sociales necesarias para la gestión sostenible de las actividades espaciales.

Convenio sobre el Registro

El Convenio sobre el Registro de Objetos Lanzados al Espacio Ultraterrestre (Resolución 3235 [XXIX] de la Asamblea General; en adelante, Convenio sobre el Registro) entró en vigor el 15 de septiembre de 1976. Estipula que las partes deben mantener un registro en el que el Estado de lanzamiento debe registrar los detalles de los objetos espaciales lanzados y cómo se debe rastrear la identidad de la parte responsable de cada objeto espacial (Button, 2012), lo cual, desde la perspectiva del concepto de desarrollo sostenible, promueve el principio de participación pública y buena gobernanza (Prasad, 2019).

Sin embargo, la sensibilidad y cantidad de los objetos espaciales y la falta de transparencia de varios Estados impiden conocer exactamente el número de satélites existentes, debido a la capacidad que tienen de ser empleados de forma mixta, es decir, tanto para temas civiles como militares (Vázquez, 2020). Asimismo, el Convenio no define el tiempo que tienen los Estados parte para notificar a la ONU sobre los objetos lanzados al espacio y existe un riesgo frente al reporte de objetos con fines diferentes a los reales, como militares o antisatélite (Álvarez Calderón y otros, 2020).

Por lo anterior, consideramos que este convenio es relevante en el problema de los desechos espaciales, debido a que tiene como objetivo el registro y gestión de los objetos lanzados a la órbita del espacio ultraterrestre. Además, requiere a los Estados mantener un registro de los objetos espaciales que lanzan y reportarlo a las Naciones Unidas, entidad que a su vez realiza un registro de ello.

Por otra parte, el convenio redacta que los Estados y cualquier organización intergubernamental internacional que hayan participado o realizado lanzamientos deberán coordinarse para el registro y acatar las solicitudes de registro. Sin embargo, este convenio presenta el problema de que no incluye a actores no estatales que realizan actividades espaciales, lo que podría limitar el proceso de registro cuando las actividades son llevadas a cabo por empresas.

Acuerdo de la Luna

El Acuerdo que Debe Regir las Actividades de los Estados en la Luna y Otros Cuerpos Celestes (Resolución 34/68 de la Asamblea General; en adelante, Acuerdo de la Luna) entró en vigor el 11 de julio de 1984. Este instrumento tiene como objetivo establecer un marco jurídico para la explotación de los recursos naturales de la Luna y otros cuerpos celestes. En sus directrices se destaca el principio de desarrollo sostenible, al señalar que «al explorar y utilizar la Luna, las partes tomarán medidas para evitar que se rompa el equilibrio existente de su medioambiente, ya sea introduciendo cambios adversos en ese medioambiente por su contaminación dañina o mediante la introducción de materia extra ambiental o de otro modo» (Prasad, 2019).

Según el análisis de las autoras, este acuerdo refleja una perspectiva de sostenibilidad en las actividades relacionadas con la Luna y establece un control en cuanto a los objetos espaciales que aterrizan en ella. Sin embargo, no aborda ni establece medidas específicas para el control y mitigación de los desechos espaciales.

Con base en el *Corpus Iuris Spatialis* previamente descrito, identificamos que, durante la fase inicial del desarrollo de los principios y acuerdos del derecho del espacio ultraterrestre, la sostenibilidad no era una prioridad reconocida en la agenda internacional como lo es ahora. Esto, de acuerdo con Prasad (2019), puede ser una consecuencia de la ausencia en el desarrollo jurídico de desarrollo sostenible o sostenibilidad.

De otro lado, se observa que los instrumentos del derecho internacional del espacio exterior se están volviendo progresivamente insuficientes y requieren ser complementados. Tal como señala Palazón (2018), es evidente que las actividades espaciales han experimentado transformaciones significativas y aceleradas que no han sido contempladas ni reguladas por estos instrumentos. Estos cambios incluyen:

1. Los cambios geopolíticos, donde nuevas potencias emergentes están modernizando sus programas espaciales y las tecnologías de doble uso;

2. El aumento progresivo de países con capacidades y agencias espaciales;
3. La entrada de nuevos actores privados dispuestos a participar en el desarrollo de aplicaciones y misiones espaciales;
4. La expansión de la cooperación internacional en proyectos espaciales;
5. El avance en la minería de asteroides y la explotación de recursos espaciales, lo que plantea nuevos desafíos legales sobre la propiedad y el uso de estos recursos;
6. El desarrollo de nuevas tecnologías basadas en inteligencia artificial y robótica, que están cambiando la forma en que se realizan las misiones espaciales y la gestión de satélites;
7. El aumento de la actividad turística espacial y su impacto en la legislación y la regulación del uso del espacio;
8. Y, como consecuencia, el aumento en la cantidad de objetos lanzados al espacio, el crecimiento de los desechos espaciales y su impacto en la sostenibilidad espacial.

Por lo anterior, en este artículo se plantea que el derecho internacional ultraterrestre desde la década de los años ochenta se ha dilatado y no ha evolucionado conforme lo han hecho las dinámicas de cambio de las actividades espaciales. Esto ha puesto de manifiesto los vacíos de su regulación, siendo esta una de las principales causas de la problemática relacionada con la falta de mecanismos adecuados para la gestión y control de los desechos espaciales. Al respecto, se evidencia que los tratados revisados no expresan las obligaciones específicas frente a la prevención y mitigación de la generación de los desechos espaciales del recurso orbital y presentan limitaciones para su gestión debido a que, en primer lugar, las regulaciones no asignan la obligación de eliminar o recoger los desechos presentes y futuros, en segundo lugar, no consideran la regulación de los actores no estatales y, finalmente, no crean recursos efectivos para resolver el impacto ambiental, económico y social en el contexto de la sostenibilidad espacial.

Por consiguiente, se identifica que los instrumentos internacionales vigentes son insuficientes para establecer y lograr objetivos claros en materia de sostenibilidad espacial y, por ende, para enfrentar adecuadamente el problema de la gestión de desechos espaciales. Sin embargo, se evidencia que los tratados más relevantes para abordar el control y registro sobre los mismos son el OST (1968), el ILD (1972) y el Convenio sobre el Registro (1975). No obstante, estos instrumentos no abordan en profundidad el aspecto ambiental. Por ejemplo, el ILD (1972) se centra en los daños geográficos y de soberanía, pero no contempla el daño desde la perspectiva ambiental

tal como se define en los principios de precaución y prevención; es decir, no considera los riesgos ambientales derivados de las actividades espaciales.

En este sentido, se identifica la necesidad de articular el derecho internacional del espacio ultraterrestre y el derecho internacional ambiental, materializando el desarrollo de instrumentos complementarios o la creación de nuevas obligaciones legalmente vinculantes en el actual ordenamiento jurídico internacional, con el fin de asegurar la protección, acceso equitativo y uso sostenible de un bien de uso común: El medio ambiente espacial y el recurso orbital. En concordancia, se resalta en la necesidad de la cooperación entre Estados y otros actores que están emprendiendo actividades espaciales, con el fin de avanzar en la estructuración de un instrumento vinculante que dicte obligaciones específicas para la gestión de los objetos espaciales y el uso sostenible del espacio ultraterrestre.

Otros instrumentos internacionales

Además de los tratados previamente señalados, existen directrices, declaraciones y acuerdos multi y bilaterales en lo que refiere a la cooperación de la exploración y uso del espacio exterior, incluyendo aquellos que se describen a continuación.

Directrices para la Reducción de Desechos Espaciales (A/RES/62/217)

Las Directrices para la Reducción de Desechos Espaciales de la Comisión Sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos son una guía para aplicar medidas de reducción de desechos espaciales; no obstante, no tienen un enfoque ambiental, sino de seguridad de las tripulaciones, dado que este tipo de desechos pueden provocar la pérdida de misiones o vidas humanas.

En contraste, plantean a los Estados tener en cuenta las fases de diseño, fabricación y funcionamiento (lanzamiento, misión y eliminación) de las naves espaciales y las etapas orbitales de los vehículos de lanzamiento. Al respecto, tal como lo aseguran Maury y otros (2017), es indispensable considerar el análisis del ciclo de vida en las actividades y misiones espaciales, de modo tal que se identifiquen y reduzcan los impactos ambientales previamente identificados.

Estas directrices prevén un mecanismo de ley blanda para reducir los desechos espaciales y, aunque han servido como base para documentos de política no vinculantes, legislación nacional de distintos países y también como punto de partida para la derivación de normas técnicas asociadas a desechos espaciales (Muñoz Patchen, 2018), la eficacia de dicho mecanismo voluntario es discutible (Prasad, 2019).

Declaración sobre el uso con fines civiles de la energía nuclear en el espacio ultraterrestre (A/RES/47/68)

De acuerdo con lo indicado previamente respecto al ya mencionado impacto de desechos con material radiactivo, se han creado estas directrices y principios pertinentes al uso de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre, las cuales establecen la aplicabilidad del derecho internacional y propenden reducir al mínimo la cantidad de material radioactivo en el espacio ultraterrestre, limitándose a aquellas misiones espaciales que no puedan funcionar razonablemente con fuentes de energía no nuclear (González Ferreiro, 2021).

Se destaca que los Estados que se acojan de forma voluntaria a las directrices anteriores, deberán incluir en su normatividad la regulación de la utilización de fuentes de energía nuclear en el espacio ultraterrestre y, el lanzamiento, ingreso y funcionamiento de objetos espaciales. Adicionalmente, deberán prever los riesgos contra las personas, la salud pública y el medio ambiente que se puedan ver afectados por estas actividades (A/AC.105/1203).

Directrices relativas a la Sostenibilidad a Largo Plazo de las Actividades en el Espacio Ultraterrestre

Estas directrices, voluntarias y no vinculantes, relativas a la sostenibilidad espacial a largo plazo para el desarrollo de actividades en el espacio ultraterrestre, se dividen en cuatro categorías: i) políticas y reglamentarias; ii) seguridad de las operaciones espaciales; iii) cooperación internacional y creación de capacidad; y iv) aspectos científicos y técnicos (Martínez, 2021). Además, describen distintos objetivos a seguir, en miras a:

1. Elaborar, revisar, modificar o aprobar marco de políticas y de regulación para las actividades espaciales a la vez de supervisar y registrar las actividades nacionales y velar por que éstas se realicen bajo el principio de uso equitativo, racional y eficiente;
2. Proporcionar seguridad de las operaciones espaciales mediante registro, recopilación, actualización, disponibilidad e intercambio de información y datos sobre la vigilancia de los desechos espaciales y las actividades en el espacio ultraterrestre, a su vez, la elaboración de modelos e instrumentos que describan el funcionamiento de los objetos espaciales para poder adoptar medidas de precaución;
3. Promover y facilitar en temas de sostenibilidad la cooperación internacional, compartir la experiencia y fomentar y apoyar la creación de capacidad;

4. Respaldar la investigación y el desarrollo científico y técnico para elaborar nuevas medidas para gestionar los desechos espaciales a largo plazo.

Las directrices no están a la vanguardia de lo que técnicamente se puede hacer para promover la seguridad espacial y la sostenibilidad de las actividades espaciales, pero establecen, por primera vez, un objetivo internacionalmente acordado frente a las normas mínimas y pautas de comportamiento de los Estados que realizan actividades espaciales (Martínez, 2021).

En consecuencia, Plattar y Smith (2021) señalan que ninguno de los tratados, acuerdos o convenios espaciales mencionan el procedimiento de ejecución en caso de que un actor espacial infrinjan una o varias recomendaciones o directrices. En este sentido, los mecanismos no vinculantes que los Estados pueden acordar están completamente desprovistos de consecuencias jurídicas, con lo cual se evidencia que estas amenazas carecen de un enfoque global, de dirección y liderazgo.

En este sentido, se evidencia que la literatura existente apunta a la necesidad de mejorar el derecho internacional espacial y abordar la amenaza al uso pacífico, beneficioso y a largo plazo del espacio ultraterrestre (Prasad, 2019). Con base en lo anterior, en este artículo se plantea que la incorporación del desarrollo sostenible en el ámbito del derecho espacial internacional es una necesidad para equilibrar el interés contrapuesto entre la exploración espacial y la preservación del medio ambiente espacial. En contraste, la ausencia de mecanismos de control sobre la generación y gestión de los desechos espaciales puede llegar a conducir a un colapso en las actividades espaciales presentes y futuras.

Agenda Espacio 2030

En la actualidad, la ONU ha generado iniciativas dirigidas a conseguir el uso compartido y pacífico del espacio, a través de la reinterpretación por la Oficina de Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, con el programa Space4SDGs, una iniciativa que se refiere al empleo del espacio como medio para lograr estos objetivos (Vázquez, 2020; Martínez, 2021).

Con motivo de la celebración del UNISPACE+50, se hizo notar que el avance en la tecnología y la ciencia genera inquietudes respecto al uso de los recursos espaciales con fines comerciales. Mencionan De Faramiñán Gilbert (2021) y Gugunskiy, Chernykh y Khairutdinov (2020) que la consecuencia de esta situación es la denominada «brecha espacial», presente entre los países con tecnología desarrollada para las actividades espaciales y los países que no han logrado dichas capacidades y se encuentran en desventaja en este ámbito. Asimismo, mencionan el problema de gobernanza global, relacionado con la falta de un marco jurídico internacional adecuado para el uso y explotación del espacio ultraterrestre que contengan soluciones sostenibles y equitativas.

Por lo anterior, la Agenda Espacio 2030 establece cuatro pilares estratégicos y transversales para abordar la brecha espacial y el problema de gobernanza global de las actividades espaciales: la economía espacial, la sociedad espacial, la accesibilidad espacial y la diplomacia espacial (A/RES/73/6). A continuación, se desarrollará cada pilar a partir del *Informe de la comisión sobre la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos de 2021*.

La economía espacial se refiere a buscar el desarrollo de beneficios económicos derivados del espacio. En el informe se describe con el objetivo de «aumentar los beneficios económicos derivados del espacio y reforzar el papel del sector espacial como motor importante del desarrollo sostenible» (A/AC.105/WG2030). Este pilar resalta la importancia de reconocer el potencial del desarrollo espacial para el crecimiento económico. En este sentido, el informe propone actividades que, en opinión de las autoras, reconocen la labor de todos los participantes en actividades espaciales y promueven la integración de toda la comunidad internacional en el reconocimiento de la importancia de la ciencia y la tecnología espacial, así como de la necesidad de usar los recursos de forma sostenible.

La sociedad espacial se refiere a la promoción de los beneficios sociales provenientes de las actividades en el espacio. El objetivo de este pilar es «utilizar el potencial del espacio para resolver los problemas cotidianos y aprovechar las innovaciones relacionadas con el espacio para mejorar la calidad de vida» (A/AC.105/WG2030). Este término tiene en cuenta el impacto que las actividades espaciales tienen sobre la sociedad. Por lo tanto, este pilar busca, en primer lugar, que las sociedades sean resilientes frente a los efectos del clima espacial y que conozcan y mitiguen los riesgos de los fenómenos espaciales. En segundo lugar, busca, a través de la cooperación, establecer un seguimiento de lo mencionado en la dimensión social, como coordinar asuntos relacionados con la salud, las comunicaciones por satélite, la predicción meteorológica, el monitoreo y vigilancia del clima y las investigaciones sobre cambio climático y ciencias de la tierra (Martínez, 2023).

La accesibilidad espacial es entendida como el acceso del espacio para todos los Estados. Su objetivo es «aumentar el acceso al espacio para todos y garantizar que todos los países puedan beneficiarse socioeconómicamente de las aplicaciones de la ciencia y la tecnología espaciales, y de los datos, la información y los productos basado en el espacio» (A/AC.105/WG2030). Esta busca garantizar que la desigualdad en capacidades tecnológicas y socioeconómicas de los Estados no evite el acceso al espacio y a la información conseguida mediante las actividades espaciales.

La diplomacia espacial tiene el objetivo de «establecer alianzas y fortalecer la cooperación internacional para la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos y para la gobernanza global de las actividades en el espacio ultraterrestre» (A/AC.105/WG2030). Con el fin de alcanzar los retos que se presentan debido a los cambios en el desarrollo de las actividades espaciales, la diplomacia busca, en primer lugar, for-

talecer los instrumentos y mecanismos ya existentes. En segundo término, pretende impulsar las alianzas entre las actividades públicas y privadas para, en tercer lugar, crear una estructura de gobernanza global en el que haya participación e intercambio de información por parte de los Estados, las organizaciones internacionales, el sector privado de la industria espacial y la sociedad.

Estos pilares llenan varios de los vacíos expuestos en los tratados. Sin embargo, no abordan la problemática de los desechos espaciales. Además, al ser compromisos de las partes, estos pilares requieren que la industria espacial y las empresas privadas del sector espacial acentúen la gestión sostenible del espacio y acaten los objetivos, lo cual es importante dado que el sector privado se ha convertido en un actor principal en el desarrollo de las actividades espaciales.

Conclusiones

A la luz de la presente revisión, se identifica un dilema respecto a la continuidad de la exploración y utilización del espacio ultraterrestre. Las actividades espaciales actuales implican un aumento constante de objetos lanzados al recurso orbital, sin que exista una reglamentación vinculante internacional adecuada que enfrente eficazmente su correlación con el incremento de los desechos espaciales y sus impactos actuales y futuros en la sostenibilidad espacial.

El derecho del espacio ultraterrestre ha dejado de evolucionar al ritmo de los cambios en las dinámicas de las actividades espaciales. Aunque se han expedido diferentes directrices, declaraciones y otros mecanismos en aras de mitigar y reducir la generación de desechos espaciales y propender por la sostenibilidad espacial, estas medidas carecen de carácter vinculante en virtud del derecho internacional.

Además, la ausencia de una definición clara, de obligaciones precisas y de mecanismos efectivos para la gestión de los desechos espaciales, refleja el punto de partida de la materialización de graves consecuencias ambientales, económicas y sociales. Entre estas, se destaca la limitación del entorno orbital espacial de la tierra, un recurso finito cuyo uso insostenible pone en riesgo el acceso para generaciones futuras. Lograr un consenso sobre la definición de desechos espaciales sería un primer paso para establecer y aplicar obligaciones concretas a los Estados respecto a su control, seguimiento y gestión.

En concordancia, se identifica que la falta de un concepto legal de desechos espaciales y de su control y gestión nos aproxima a un punto del síndrome de Kessler, en el cual no se trata de si los objetos espaciales colisionarán, sino de cuándo lo harán. Este escenario expone la necesidad de desarrollar una diplomacia espacial y una gobernanza global que aborden específicamente el uso sostenible del espacio y establezcan procesos eficaces de control de los desechos espaciales.

En este sentido, sostenemos que los tratados internacionales revisados presentan vacíos importantes al omitir regulaciones específicas para las actividades espaciales de actores no estatales y carecer de recursos efectivos para abordar los impactos ambientales, económicos y sociales relacionados con la sostenibilidad espacial. Estos instrumentos internacionales son insuficientes y requieren complementarse con normativas que prioricen la sostenibilidad espacial y superen el enfoque tradicional de soberanía y seguridad de las partes.

En este artículo se propone la oportunidad de coordinar el derecho internacional del espacio ultraterrestre con el derecho internacional ambiental en un instrumento que complemente los presentados. Este deberá entender el carácter común del medio ambiente espacial y el recurso orbital y ser respaldado por la cooperación entre Estados, actores, regiones y sectores privados. De esta forma, se asegurará la protección, el acceso equitativo y el uso sostenible del recurso, además del cumplimiento de los compromisos contemplados en la Agenda Espacio 2030. Asimismo, se sugiere extrapolar al marco espacial los principios del derecho internacional ambiental, con la fijación de umbrales de contaminación y aplicándolos a las actividades espaciales públicas y privadas para establecer límites claros.

Finalmente, consideramos que, de no avanzar hacia un marco jurídico integral apoyado en el derecho internacional ambiental, a futuro se verán afectadas iniciativas comerciales y económicas como el turismo y los viajes espaciales, la minería espacial y la exploración de futuros hábitats para el ser humano. Esto dificultará, además, la gestión y eliminación de los desechos actuales y los generados a futuro.

Para futuras investigaciones, se considera necesario examinar los tratados del derecho internacional que regulan la exploración y la utilización del espacio ultraterrestre, así como los desechos espaciales generados debido a estas actividades, conforme a los principios de la Declaración de Río de 1992. Este enfoque brindará una perspectiva del derecho internacional ambiental que permitirá abordar de manera más extensa la problemática planteada en este artículo.

Referencias

- ADILOV, Nodir, Brandan M. Cunningham, Peter J. Alexander, Jerry Duvall y Daniel R. Shiman (2019). «Left for dead: Anti-competitive behavior in orbital space». *Economic Inquiry*, 57 (3), 1497-1509.
- ADILOV, Nodir, Peter J. Alexander y Brendan M. Cunningham (2018). «An economic “Kessler Syndrome”: A dynamic model of earth orbit debris». *Economics Letters*, 166: 79-82. DOI: [10.1016/j.econlet.2018.02.025](https://doi.org/10.1016/j.econlet.2018.02.025).
- . (2020). «The economics of orbital debris generation, accumulation, mitigation, and remediation». *The Journal of Space Safety Engineering*, 7 (3): 447-50. DOI: [10.1016/j.jsse.2020.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jsse.2020.07.016).

- ADUSHKIN, Vitaly, Oleg Aksenov, Sergey Veniaminov, Sergey Kozlov y Velantina Tyurenkova (2020). «The small orbital debris population and its impact on space activities and ecological safety». *Acta Astronautica*, 176: 591-97. DOI: [10.1016/j.actaastro.2020.01.015](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.015).
- ÁLVAREZ CALDERÓN, Carlos Enrique, Álvaro Molano Valbuena, Carlos Giovanni Corredor Gutiérrez y Martín Fernando Zorilla (2020). «El espacio exterior, escenario de competencia o cooperación en América del Sur: Los casos de Argentina, Brasil, México y Venezuela». En Carlos Gutiérrez y Carlos Corredor (editores), *El Espacio exterior: Una oportunidad infinita para Colombia. Volumen 1* (pp. 239-282). Bogotá: Escuela Superior de Guerra y Fuerza Aérea Colombiana.
- ASCHBACH, Josef (2020). «ESA and the tri-agency dashboard». *AGU Fall Meeting Abstracts 2020*: 012-01.
- BENNIE, Jonathan, Thomas W. Davies, David Cruse y Kevin J. Gaston (2016). «Ecological effects of artificial light at night on wild plants». *Journal of Ecology*, 104 (3): 611-620.
- BOLEY, Aaron C. y Michael Byers (2021). «Satellite mega-constellations create risks in low Earth orbit, the atmosphere and on Earth». *Sci Rep-UK*, 11: 10642.
- BUTTON, Mary (2012). «Cleaning up space: The Madrid Protocol to the Antarctic Treaty as a model for regulating orbital debris». *William & Mary Environmental Law and Policy Review*, 37 (2): 539-68.
- BYERS, Michael (2022). «Unnecessary risks created by uncontrolled rocket reentries». *Nature Astronomy*, 6: 1093-1097. Disponible en <https://tipg.link/SNDv>.
- CATALÁ, Melanie Ruiz (2022). «La conquista espacial: La responsabilidad de los Estados por las actividades de las empresas en el espacio ultraterrestre». *Revista Boliviana de Derecho*, 33: 724-51.
- CHRYSAKI, Margarita (2020). «The sustainable commercialization of space: The case for voluntary code of conduct for the space industry». *Space Policy*, 52: 101375. DOI: [10.1016/j.spacepol.2020.101375](https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2020.101375).
- DALLAS, James, Sanjay Raval, Javier P. Álvarez Gaitán, Süleyman Saydam y Andrew G. Dempster (2020). «The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review». *Journal of Cleaner Production*, 255. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.120209](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120209).
- DE FARAMIÑÁN GILBERT, Juan Manuel (2020). *Las controvertidas cuestiones sobre la minería espacial: Lagunas jurídicas en la regulación del espacio ultraterrestre*. Santa Cruz de Tenerife: Kinnamon.
- . (2021). «Nuevas propuestas para el desarrollo sostenible en el espacio ultraterrestre». *Revista Española de Derecho Internacional*, 73 (1): 111-36.
- DELGADO-MARTÍNEZ, Juan Guillermo y Ricardo Álvarez-León (2018). «Aspectos bioéticos relacionados con la basura espacial y sus efectos sobre la vida en la Tierra y la exploración aeroespacial». *Persona y Bioética*, 22 (1): 39-55.

- ERHART, Luca y Maria Boutovitskai (2021). «Transforming article VI of the Outer Space Treaty into an effective mechanism of space debris mitigation». *Proc. 8th European Conference on Space Debris*, 8: 20-23. Disponible en <https://tipg.link/SMMY>.
- FOSTER, James J., Jochen Smolka, Dan-Eric Nilsson y Marie Dacke (2018). «How animals follow the stars». *Royal Society B: Biological Sciences*, 285: 20172322. DOI: [10.1098/rspb.2017.2322](https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2322)
- GALDÁMEZ BALLESTER, Cristina y Francisca Ramón Fernández (2021). «Objetos, vehículos y tripulaciones en el transporte en el Espacio Ultraterrestre». *Revista de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas*, 51 (135): 368-95.
- GASTON, Kevin J., Karen Anderson, Jamie Shutler, Bob Brewin y Xiaoyu Yan (2023). «Environmental impacts of increasing numbers of artificial space objects». *Frontiers in Ecology and the Environment*, 21 (6): 289-96. DOI: [10.1002/fee.2624](https://doi.org/10.1002/fee.2624).
- GONZÁLEZ FERREIRO, Elisa Celia (2021). «La regulación de las actividades espaciales como estrategia de seguridad y crecimiento nacional». *Cuadernos de Estrategia*, 208: 213-94.
- GUGUNSKIY, Denis, Irina Chernykh y Albert Khairutdinov (2020). «Legal model for activities on the exploration and utilization of space resources: Towards the Space-2030». En *Agenda: Advances in Intelligent Systems and Computing. Volumen 1100*. Chan: Springer. DOI: [10.1007/978-3-030-39319-9_73](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39319-9_73).
- HEARNSHAW, John (2024). «Light pollution and the future of space science and astronomy». In *Ascending to Space: Critical Perspectives from New Zealand and other Nations* (pp. 259-271). Singapore: Springer Nature Singapore. DOI: [10.1007/978-981-97-0714-0_12](https://doi.org/10.1007/978-981-97-0714-0_12).
- HUTAGALUNG, Jaya, Clara Tobing, Jonathan Debastri y Rina Amanda (2020). «Space debris as environmental threat and the requirement of Indonesia's prevention regulations». *IOPP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 456 (1): 012081. DOI: [10.1088/1755-1315/456/1/012081](https://doi.org/10.1088/1755-1315/456/1/012081).
- IANNINI MARTÍNEZ, María Camila (2012). «Los desechos espaciales y su tratamiento en el derecho del espacio ultraterrestre». *Revista de Derecho Público*, 29: 1-35.
- IRWIN, Aisling (2018). «The dark side of light: How artificial lighting is harming the natural world». *Nature*, 553 (7688): 268-271.
- JERÓNIMO, Raúl Antonio (2021). *El derecho en el espacio ultraterrestre y el régimen jurídico de los objetos espaciales*. Trabajo de grado en Derecho, Universidad de La Laguna. Disponible en <https://tipg.link/SMO4>.
- JIMÉNEZ GONZÁLEZ, Marta (2022). *Nuevos retos jurídicos internacionales en el espacio ultraterrestre: Hacia una explotación económica sostenible*. Trabajo de grado en Derecho internacional Público, Comillas Universidad Pontificia.
- KESSLER, Donald J. y Burton G. Cour-Palais (1978). «Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt». *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 83 (A6): 2637-46. DOI: [10.1029/JA083iA06p02637](https://doi.org/10.1029/JA083iA06p02637).

- KOCIFAJ, Miroslav, Kundračik Filip, Jason Barentine y Samuel Bará (2021). «The proliferation of space objects is a rapidly increasing source of artificial night sky brightness». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 504 (1): L40-L44. DOI: [10.1093/mnrasl/slabo30](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slabo30).
- LÓPEZ DELGADO, Laura (2016). «Space sustainability approaches of emerging space nations: Brazil, Colombia, and Mexico». *Space Policy*, 37 (1): 24-29. DOI: [10.1016/j.spacepol.2015.12.004](https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2015.12.004).
- MARTÍNEZ, Peter (2018). «Development of an international compendium of guidelines for the long-term sustainability of outer space activities». *Space Policy*, 43: 13-17.
- . (2021). «The Uncopuos guidelines for the long-term sustainability of outer space activities». *Journal of Space Safety Engineering*, 8 (1): 98-107.
- . (2023). «The development and implementation of international UN guidelines for the long-term sustainability of outer space activities». *Advances in Space Research*, 72 (7). DOI: [10.1016/j.asr.2022.06.046](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.06.046).
- MAURY, Thibaut, Philippe Loubet, Jonathan Ouziel, Maud Saint-Amand, Ludovic Dariol y Guido Sonnemann (2017). «Towards the integration of orbital space use in life cycle impact assessment». *Science of the Total Environment*, 595: 642-50.
- MAURY, Thibaut, Philippe Loubet, Sara Morales Serrano, Aurélie Gallice, y Guido Sonnemann (2020a). «Application of environmental life cycle assessment (LCA) within the space sector: A state of the art». *Acta Astronautica*, 170: 122-35. DOI: [10.1016/j.actaastro.2020.01.035](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.035).
- MAURY, Thibaut, Sara Morales Serrano, Philippe Loubet, Guido Sonnemann y Camilla Colombo (2019). «Assessing the impact of space debris on orbital resource in life cycle assessment: A proposed method and case study». *Science of The Total Environment*, 667 (1): 780-791. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.02.438](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.438).
- . (2020b). «Space debris through the prism of the environmental performance of space systems: The case of Sentinel-3 Redesigned Mission». *Journal of Space Safety Engineering*, 7 (3): 198-205.
- MIGAUD, Michal R. (2020). «Protecting Earth's orbital environment: Policy tools for combating space debris». *Space Policy*, 52: 101361.
- MIRAUX, Loïs (2022). «Environmental limits to the space sector's growth». *Science of The Total Environment*, 806: 150862.
- MUÑOZ PATCHEN, Chelsea (2018). «Regulating the space commons: Treating space debris as abandoned property in violation of the outer space treaty». *Chicago Journal of International Law*, 19 (1): 233-259. Disponible en <https://tipg.link/SMOW>.
- NAZARENKO, Andrei e Iván Usovik (2022). «Space debris in low earth orbits region: Formation and Reduction Process Analysis In Past Decade». *Acta Astronautica*, 194: 383-89. DOI: [0.1016/j.actaastro.2021.12.001](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.12.001).


- NIKOLICHEV, I.A., y V.V. Svotina (2024). «Contactless space debris removal from the geostationary orbit protected region». *Acta Astronautica*, 215 : 523-33. DOI: [10.1016/j.actaastro.2023.12.019](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.12.019).
- OSTROM, Elinor (2010). «Beyond markets and states: Polycentric governance of complex economic systems». *American Economic Review*, 100 (3): 641-72. DOI: [10.1257/aer.100.3.641](https://doi.org/10.1257/aer.100.3.641).
- PALAZÓN, Miguel (2018). «Los desafíos medioambientales en el espacio ultraterrestre en el marco de la segunda era espacial». *Revista del Instituto Español de Estudios Estratégicos*, 12: 177-214.
- PALMROTH, Mima, Jari Tapio, Adam Soucek, Anni Perrels, Michael Jah, Mikko Lönnqvist, Mikko Nikulainen, Vaida Piaulokaite, Tuomas Seppälä y Jari Virtanen (2021). «Toward sustainable use of space: Economic, technological, and legal perspectives». *Space Policy*, 57. DOI: [10.1016/j.spacepol.2021.101428](https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2021.101428).
- PARDINI, Carmen y Luciano Anselmo (2022). «Using the space debris flux to assess the criticality of the environment in low earth orbit». *Acta Astronautica*, 198: 756-760-760. DOI: [10.1016/j.actaastro.2022.05.045](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.05.045).
- PASTOR, José Antonio (2016). *Curso de Derecho Internacional Público y Organizaciones Internacionales*. Madrid: Tecnos.
- PELTON, Joseph N. (2019). «A path forward to better space security: Finding new solutions to space debris, space situational awareness and space traffic management». *Journal of Space Safety Engineering*, 6 (2): 92-100.
- PLATTARD, Serge y Alan Smith (2021). «Reducing vulnerabilities of space activities: A call for coordinated leadership at the global level». *Journal of Space Safety Engineering*, 8 (4): 323-30.
- POPOVA, Rada y Volker Schaus (2018). «The legal framework for space debris remediation as a tool for sustainability in outer space». *Aerospace*, 5 (2): 55. DOI: [10.3390/aerospace5020055](https://doi.org/10.3390/aerospace5020055).
- PRASAD, M. Deva (2019). «Relevance of the sustainable development concept for international space law: An analysis». *Space Policy*, 47: 166-74.
- RAO, Akhil, Matthew G. Burgess y Daniel Kaffine (2020). «Orbital-use fees could more than quadruple the value of the space industry». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117 (23): 12756-12762. DOI: [10.1073/pnas.1921260117](https://doi.org/10.1073/pnas.1921260117).
- RESTREPO SALAZAR, Alex David, y Wadneth Lemus Romaña (2018). *Amenaza al principio de libertad de acceso al espacio ultraterrestre instituido por el tratado de 1967*. Trabajo de grado para optar al título de abogado, Universidad Autónoma Latinoamericana.
- REY MORA, Daniel Enrique (2021). *Derecho internacional y economía política en el cosmos: Geopolítica, intereses y límites en la explotación de recursos naturales en el*

- espacio ultraterrestre*. Tesis para optar al magíster en Estudios Internacionales y Derecho Internacional, Universidad de Los Andes.
- RICH, Catherina y Travis Longcore (2013). *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press.
- ROSS, Martin, Darin Toohey, Manfred Peinemann y Patrick Ross (2009). «Limits on the space launch market related to stratospheric ozone depletion». *Astropolitics*, 7 (1), 50-82.
- SÁNCHEZ MAYORGA, Jaime (2023). «La cooperación internacional en la competición por el espacio exterior». *Araucaria*, 25 (53): 255-80. DOI: [araucaria.2023.153.10](https://doi.org/10.22345/araucaria.2023.153.10).
- SCHULZ, Leonard and Karl-Heinz Glassmeier (2021). «On the anthropogenic and natural injection of matter into Earth's atmosphere». *Advances in Space Research*, 67: 1002-10025.
- SHAN, Minghe y Lingling Shi (2022). «Comparison of tethered post-capture system models for space debris removal». *Aerospace*, 9 (1): 33. DOI: [10.3390/aerospace9010033](https://doi.org/10.3390/aerospace9010033).
- SHEER, Abbas, Sidra Fatima, Mohammad Owais Farooqui y Muhammad Ramzan Kasuri (2023). «A panacea to address the legal, administrative and economic aspects of space debris». *Space Environment Management and Space Sustainability*, 72 (7): 2616-2626. DOI: [10.1016/j.asr.2023.02.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.02.023).
- SIMÓN, Lisette Farah, Samuel Daniel Gutiérrez, Juan Alberto Adam Siade, Carlos Romo Fuentes y Alberto Aguilar (2013). «The project management model that incorporates the spatial sustainability within the design process of small satellites». *2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*: 565-569. DOI: [10.1109/RAST.2013.6581275](https://doi.org/10.1109/RAST.2013.6581275).
- SIRIEYS, Elwyn, Chloe Gentgen, Asha Jain, Julia Milton, y Olivier L. de Weck (2022). «Space sustainability isn't just about space debris: On the atmospheric impact of space launches». *MIT Science Policy Review*, 3: 143-51. DOI: [10.38105/spr.whfig18hta](https://doi.org/10.38105/spr.whfig18hta).
- TOMIZAKI, Honoka, Ryohei Kobayashi, Myumi Suzuki, Nanami Karasawa, Sunao Hasegawa y Kanjuro Makihara (2021). «Assessment of space debris collisions against spacecraft with deorbit devices». *Advances in Space Research*, 67 (5): 1526-1534.
- TRONCHETTI, Fabio (2013). *Fundamentals of space law and policy*. Volumen 26. Nueva York: Springer.
- TRUR, Aurélie (2021). «Governance aspects of space sustainability: The role of epistemic actors as enablers of progress». *Acta Astronautica*, 180: 451-59.
- TYSON, J. Anthony, Željko Ivezić, Andrew Bradshaw, Meredith L. Rawls, Bo Xin, Peter Yoachim, Jared Greene, John Parejko, Michael Sholl, y Timothy M. C Abbott (2020). «Mitigation of LEO Satellite Brightness and Trail Effects on the Rubin Observatory LSST». *The Astronomical Journal*, 160 (5): 226. DOI: [10.3847/1538-3881/abbaz3e](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abbaz3e).

- UNDSETH, Marit, Claire Jolly y Mattia Olivari (2020). «Space sustainability: The economics of space debris in perspective». *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, 87: 63. DOI: [10.1787/a339de43-en](https://doi.org/10.1787/a339de43-en).
- URREA, Laura Botero (2013). «Régimen jurídico de los objetos espaciales». *Revista de Derecho, Comunicaciones y Nuevas Tecnologías*, 10: 1-25
- USOVIK, Igor (2024). «Perspective of non-catalogued space debris removal and monitoring». *Acta Astronautica*, 215: 471-74. DOI: [10.1016/j.actaastro.2023.12.018](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.12.018).
- VÁZQUEZ, Borja García (2020). «El espacio ultraterrestre, ámbito de difusión de la paz y medios para lograrlo». *Diké: Revista de Investigación en Derecho, Criminología y Consultoría Jurídica*, 28: 247-80.
- WEN, Quan, Liwei Yang, Shanghong Zhao, Yingwu Fang, Yi Wang y Rui Hou (2018). «Impacts of orbital elements of space-based laser station on small scale space debris removal». *Optik*, 154: 83-92. DOI: [10.1016/j.ijleo.2017.10.008](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.10.008).
- WRIGHT, David (2007). «Orbital debris produced by kinetic-energy anti-satellite weapons». *Celebrating the Space Age*, 50: 155-164.
- ZHU, Martin K. (2022). «A break-even analysis of orbital debris and space preservation through monetization». *Journal of Space Safety Engineering*, 9 (14): 600-611. DOI: [10.1016/j.jsse.2022.08.007](https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.08.007).

Sobre las autoras

DANIELA CHAPETÓN RÍOS es magíster en Derecho y Gestión Ambiental por la Universidad del Rosario en Colombia. Su correo electrónico es daniela.chapeton@urosario.edu.co.  <https://orcid.org/0009-0007-3921-4806>.

JENNIFER OCHOA PRIETO es Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás en Colombia. Su correo electrónico es jennifer.ochoa@urosario.edu.co.  <https://orcid.org/0009-0007-3766-8599>.

La *Revista de Derecho Ambiental*, del Centro de Derecho Ambiental de la Facultad de Derecho de la Universidad de Chile, es un espacio de exposición y análisis en el plano académico del derecho ambiental. Su contenido se presenta a través de doctrina, jurisprudencia y reseñas, y aborda diversas materias relacionadas con la gestión, institucionalidad y herramientas de protección ambiental y desarrollo sustentable. Se presentan artículos de diferentes autores y autoras en los que se analizan y abordan casos y temas jurídico-ambientales de creciente interés y actualidad.

DIRECTORA

Pilar Moraga Sariego

EDITOR

Jorge Ossandón Rosales

SITIO WEB

revistaderechoambiental.uchile.cl

CORREO ELECTRÓNICO

revistada@derecho.uchile.cl

LICENCIA DE ESTE ARTÍCULO

Creative Commons Atribución Compartir Igual 4.0 Internacional



La edición de textos, el diseño editorial
y la conversión a formatos electrónicos de este artículo
estuvieron a cargo de Tipografía
(www.tipografica.io)