

Impacto de la basura espacial en la industria espacial comercial

Francisco Pizarro
Magíster en Ciencias

Con el lanzamiento del Sputnik 1 en 1957, comenzó la carrera espacial. Lamentablemente, en paralelo se inició otro tipo de carrera: la de la basura espacial orbital (BEO). Después de 63 años, con más de nueve mil lanzamientos de satélites, colisiones en órbita, armas antisatélite (ASAT) y misiles balísticos intercontinentales (ICBM), la cantidad de desechos espaciales aumentó a más de 128 millones (ESA, 2020). Muchos satélites han desaparecido, algunos se han quemado en la atmósfera, otros se han estrellado contra otros satélites y otros fueron destruidos por misiles de prueba ASAT o dados de baja, dejando 5.500 satélites todavía en órbita; sin embargo, sólo 2.300 satélites están operativos (ESA, 2020). Por lo tanto, 3200 satélites están en órbita con un riesgo potencial de generar más desechos espaciales.

De acuerdo con el síndrome de Kessler, un efecto en cascada, se multiplicarían los desechos espaciales existentes durante los próximos dos siglos, saturando el entorno espacial y haciéndolo inseguro para las misiones espaciales (Mason, Stupl, Marshall y Levit, 2011). Las velocidades orbitales varían según su altitud, es decir, cuanto menor sea la altitud, mayor será la velocidad para contrarrestar la gravedad y permanecer en órbita. Por lo tanto, un OSD minúsculo, del

tamaño de una bala calibre .22 que viaja a 13,5 km/s, puede causar efectos significativos o catastróficos en las naves espaciales; por lo tanto, representan una amenaza significativa para la vida humana en el espacio y las operaciones espaciales en general. Además, a diferencia de la contaminación terrestre estándar, los desechos espaciales propagan contaminación adicional (Adilov et al., 2015). Esta auto propagación, relacionada con el síndrome de Kessler y una característica distintiva de la BEO, no reconoce países, naves espaciales o vida; por lo tanto, afectará las actividades espaciales gubernamentales y, en definitiva, a la industria espacial comercial.

Además, otra característica relevante y no deseada de la BEO es su persistencia. Las órbitas de menos de 200 km de altura pueden autolimpiarse, es decir, la nave espacial será atraída hacia la atmósfera de la Tierra y se quemará; sin embargo, las naves espaciales y las BEO pueden permanecer en órbita a estas altitudes durante décadas e incluso siglos (Adilov et al., 2015). “El entorno actual de desechos orbitales ya ha alcanzado un punto de inflexión” (US National Research Council et al., 2012). Las actividades espaciales comerciales inicialmente tendrán que compartir la órbita terrestre baja (LEO) con otras naves espaciales, pero con basura

espacial orbital, concentradas a una altitud de 890 km (Adilov et al., 2015). Por lo tanto, se amenaza la sostenibilidad de las operaciones espaciales en LEO a largo plazo, reduciendo su valor debido a los riesgos operacionales (Undseth, Jolly y Olivari, 2020).

El Tratado del Espacio Exterior (OST) incluye los daños causados por sus responsabilidades solamente entre los estados miembros (Naciones Unidas, 1966). Sin embargo, el OST no aborda la responsabilidad por el problema de la BEO. Por esta razón, muchas organizaciones monitorean y enfrentan este problema global. Aunque muchos países han desarrollado, aceptado e implementado pautas de mitigación, no son suficientes para reducir significativamente la cantidad de BEO (Adilov, Alexander y Cunningham, 2018). El impacto económico de un entorno espacial inseguro puede impedir o retrasar el desarrollo y la excelencia de la industria

espacial comercial. Diferentes estudios teóricos sustentan que, sin las regulaciones adecuadas, el problema de la BEO solo empeoraría.

PROPÓSITO Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

El propósito de este trabajo de investigación es identificar los efectos potenciales que la basura espacial orbital puedan tener en la industria espacial comercial. Al examinar el entorno de los desechos espaciales, el marco legal relacionado con las actividades espaciales y las operaciones actuales y futuras de la industria espacial comercial, esta investigación contribuirá a aumentar la base de conocimientos de los investigadores y de la industria espacial, respondiendo la siguiente interrogante: *¿Cuál sería el impacto teórico potencial de la basura espacial orbital en la industria espacial comercial?*

Tabla 1

Basura espacial orbital en números (Space environment statistics 2020)

Parámetro	Cantidad
Lanzamientos desde 1957	Aproximadamente 5.970
Satélites desde 1957	Aproximadamente 10.130
Satélites en el espacio	Aproximadamente 5.780
Satélites Operacionales	Aproximadamente 3.000
Objetos siendo traqueados ¹	Aproximadamente
27.400 Fragmentación por separación, explosiones, colisiones u otros	Sobre 550
Masa total de la basura espacial orbital	Sobre 9.000
tons	
Objetos de tamaño mayor a 10 cm	34.000
Objetos de tamaño entre 1 cm y 10 cm	900.000
Objetos de tamaño entre 1 mm y 1 cm	128 millones

Nota. 1) Objetos rastreados y catalogados regularmente por la Red de Vigilancia Espacial (SSN)

REVISIÓN DE LITERATURA

La evolución del entorno espacial desde 1957, con el lanzamiento del Sputnik 1, se ha destacado por muchos éxitos, muertes y desechos espaciales. Entre otros, todos los lanzamientos en la historia consideraron que partes del vehículo permaneciera en órbita alrededor de la Tierra, por ejemplo, cuerpos de cohetes, objetos relacionados con misiones de cohetes, cargas útiles, así como derivados de ellos como desechos y desechos de fragmentación (ESA Space Debris Office, 2020). La Tabla 1 muestra el número aproximado de objetos en el espacio desde 1957. Se presta especial atención al número

de lanzamientos teniendo en cuenta que los desechos espaciales comprenden cargas útiles, objetos relacionados con misiones de carga útil, desechos de fragmentación de carga útil, desechos de carga útil, cuerpos de cohetes, objetos relacionados con misiones de cohetes, desechos de fragmentación de cohetes y desechos de cohetes (Oficina de desechos espaciales de la ESA, 2020).

Las órbitas alrededor de la Tierra se definen entre muchos parámetros, por su inclinación (i), apogeo (ha) y perigeo (hp). Además, la excentricidad de la órbita (e), es decir, cuán elíptica es la órbita, determina la diferencia de altitud entre ha y hp . Se pueden obtener

Tabla 2

Órbitas por su inclinación, apogeo, y perigeo (ESA Space Debris Office, 2020).

Órbita	Descripción	Inclinación	Perigeo (km)	Apogeo (km)
GEO	Geostationary Orbit	0° - 25°	35.586	35.586
IGO	Inclined Geosynchronous Orbit	25° - 180°	37.948	46.380
EGO	Extended GEO	0° - 25°	37.948	46.380
NSO	Navigation Satellites Orbit	0° - 25°	18.100 - 24.300	18.100 - 24.300
GTO	GEO Transfer Orbit	0° - 90°	0 - 2.000	31.570 - 40.002
MEO	Medium Earth Orbit		2.000 - 31.570	2.000 - 31.570
GHO	GEO-superGEO Crossing orbits		31.570 - 40.002	>40.002
LEO	Low Earth orbit		0 - 2.000	0 - 2.000
HAO	High Altitude Earth Orbit		>40.002	>40.002
MGO	MEO-GEO Crossing orbits		2.000 - 31.570	31.570 - 40.002
HEO	Highly Eccentric Earth Orbit		0 - 31.570	>40.002
LMO	LEO-MEO Crossing Orbit		0 - 2.000	2.000 - 31.570
UFO	Undefined Orbit			
ESO	Escape Orbit			

diferentes configuraciones de órbita a partir de estos conceptos básicos, por ejemplo, circular, polar, elíptica y geoestacionaria. Desde la perspectiva de la altitud orbital, se pueden identificar tres tipos principales de órbitas. La órbita terrestre baja (LEO) varía de 100 km a 2.000 km, la órbita terrestre media (MEO) se expande de 2.000 km a 31.570 km y la órbita terrestre de gran altitud (HAO) se extiende a cualquier altitud por encima de los 40.000 km (ESA Space Debris office, 2020). De la Oficina de Desechos Espaciales de la ESA (2020), la Tabla 2 proporciona una breve descripción de otros tipos de órbitas.

A partir de 2020, los desechos espaciales se distribuyen principalmente dentro de la LEO, lo que representa casi el 55% del total de objetos rastreados; sin embargo, su masa se distribuye de manera más uniforme entre LEO, GEO y otras órbitas (Estadísticas del entorno espacial. 2020). La Figura 1 muestra el modelo de distribución de desechos espaciales de Horstmann et al. (2018), por densidad espacial

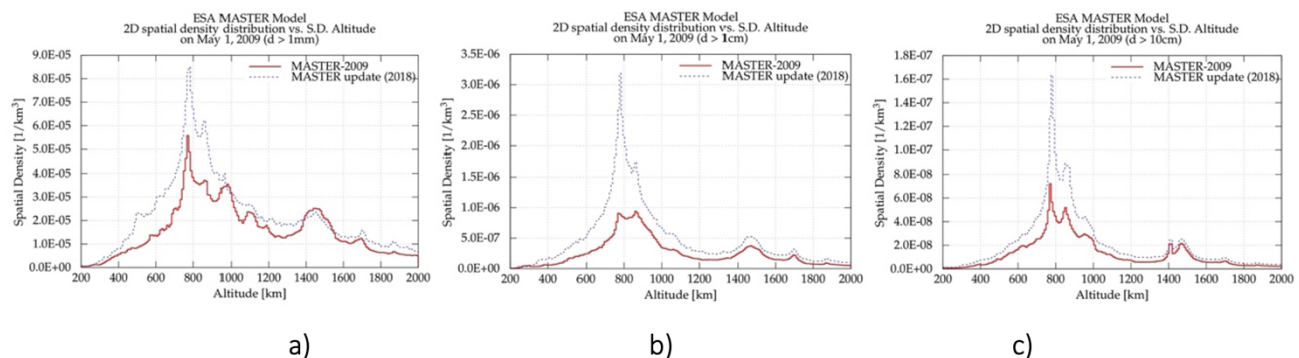
y altitud dentro de la LEO utilizando el modelo ESA MASTER de 2009.

A partir de la Figura 1, se identifica una región especial. La mayoría de los objetos de desechos espaciales se concentran entre 500 km y 1400 km. Siguiendo el síndrome de Kessler para pronósticos a largo plazo, la población de desechos espaciales LEO aumentaría a tasas crecientes durante los próximos 200 años, especialmente en estas altitudes (Drmola & Hubik, 2018; Horstmann et al., 2018; Mason et al., 2011). Por lo tanto, el entorno de contaminación espacial representa una grave amenaza para los vuelos espaciales robóticos y humanos (Murtaza, Pirzada, Xu y Jianwei, 2020).

Adilov et al. (2015) evaluaron el problema de los desechos espaciales persistentes y autopropagantes desde una perspectiva económica. Propusieron un escenario ideal en el que no existen objetos espaciales para comenzar a desarrollar teóricamente un

Figura 1

Densidad espacial de desechos espaciales en función de la altitud (km) dentro de la LEO utilizando el modelo ESA MASTER de 2009 y 2018, para objetos mayores de a) 1 mm, b) 1 cm y c) 10 cm (Horstmann et al., 2018).



modelo en términos de momentos. Además, evaluaron y demostraron dos enfoques: 1) utilizando una estructura de mercado competitiva y 2) desde una perspectiva de “planificador social”. La estructura del mercado competitivo se centró en los costos y la rentabilidad de los lanzamientos y operación de satélites. Consecuentemente, una estructura de mercado competitiva fomenta más lanzamientos de satélites sin tener en cuenta las pérdidas de satélites debidas a la creación de desechos espaciales. Por el contrario, un planificador social logra un equilibrio entre el aumento de los costos de las empresas y la disminución de los costos de transporte cuando se lanza un nuevo satélite. Curiosamente, Adilov et al. (2015) identificaron que las empresas competitivas evitan tecnologías costosas para aumentar sus ganancias al sacrificar los sistemas de eliminación y mitigación de desechos; por lo tanto, alimentando el síndrome de Kessler. Adilov et al. (2018) utilizaron estos escenarios para evaluar el modelo de colisión en cascada, generalizándolo a cualquier órbita. Las colisiones entre satélites y desechos espaciales orbitales sin duda crearán desechos espaciales adicionales. Siguiendo las reglas del mercado competitivo, aumentarían los lanzamientos de satélites y los desechos espaciales, y una mayor probabilidad de inutilizar las órbitas (Adilov et al., 2018). Además, contrastaron sus teorías anteriores con las estrategias de mitigación, incluidas las directrices de mitigación de la Oficina de Asuntos del Espacio Exterior de las Naciones Unidas (UNOOSA), los impuestos sobre desechos espaciales y los instrumentos de precios de tope y comercio, y la eliminación

activa de desechos espaciales LEO de más de 10 cm. Con una correlación simple del síndrome de Kessler y los enfoques de empresas competitivas con las estrategias de mitigación propuestas para reducir y eliminar los desechos espaciales, Adilov et al. (2020) concluyeron que: 1) las pautas de mitigación y los impuestos pueden reducir las tasas de acumulación de desechos espaciales, y 2), **sólo la eliminación activa de desechos reduce la cantidad acumulada** (Adilov et al., 2020).

Los recursos de espacio son limitados. La LEO otorga un poco más de dos millones de cupos para satélites (Arnas et al., 2020A; Arnas et al., 2020B). Lamentablemente, esta órbita también concentra en el mayor número de desechos espaciales; por lo tanto, tiene las probabilidades de colisión más altas. El Comité de las Naciones Unidas sobre el Uso del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (UN COPUOS) estimó que el tiempo medio entre colisiones para el segmento de 1.000 km fluctúa entre tres y 30 años para los más de 128 millones de desechos espaciales (UN COPUOS, 1999). La Tabla 3 proporciona otras estimaciones para otros tamaños de desechos espaciales y altitudes de órbita. Le May et al. (2018) llegaron a una conclusión similar al simular diferentes escenarios de negocios espaciales en los que integraron la variable basura espacial. Curiosamente, sus modelos pronostican una alta probabilidad de **colisión de al menos un satélite cada cinco años**. Además, Le May et al. (2018) demostraron que un mayor número de satélites aumenta significativamente la probabilidad de una colisión catastrófica. Por lo tanto, identificar la

Tabla 3

Tiempo medio entre impactos en un satélite con un área de sección transversal de diez metros cuadrados (UN COPUOS, 1999)

Altura de órbita	Objetos 1-10 mm	Objetos 10-100 mm	Objetos > 100 mm
500 km	10-100 años	3.500-7.000 años	150.000 años
1,000 km	3-30 años	700-1.400 años	20.000 años
1,500 km	7-70 años	1.000-2.000 años	30.000 años

necesidad de medidas adicionales garantiza la sostenibilidad del espacio, especialmente considerando futuras megaconstelaciones como Starlink y OneWeb de SpaceX (Le May et al., 2018).

En total, los datos y la literatura respaldan que los desechos espaciales son un problema persistente y que se propaga a sí mismo. Además, las industrias espaciales comerciales competitivas podrían agravar la situación mediante el lanzamiento masivo de satélites. Finalmente, las pautas y estrategias de mitigación para reducir la acumulación de desechos espaciales no son suficientes para eliminar el problema, ya que las tecnologías de eliminación activa aún están en desarrollo.

MARCO LEGAL RELATIVO A LAS ACTIVIDADES ESPACIALES

Los desechos espaciales son un problema creciente al que han contribuido todas las naciones con capacidad espacial. Las leyes internacionales existen como instrumentos legalmente vinculantes y de regulación para asegurar relaciones internacionales apropiadas. Las industrias comerciales con

capacidades globales deben cumplir con las leyes locales y estatales para realizar sus negocios. La ley y otros tratados relacionados al espacio existen para regularlo, pero desde una perspectiva de Estado (UNOOSA, 2019). Chrysaki (2020) proporciona una evaluación en profundidad del Tratado del Espacio Exterior (OST) y otros tratados, identificando las brechas legales entre ellos y la industria espacial comercial. Al reconocer que los asuntos de Estado han cambiado desde el final de la Guerra Fría, Chrysaki (2020) reconoce que la industria espacial comercial es un dominio floreciente que fortalece la innovación empresarial al tiempo que da la bienvenida a actores más nuevos y pequeños. El sector privado está creciendo rápidamente para aprovechar la comercialización del espacio. También analiza el concepto de sustentabilidad desde diferentes perspectivas, vinculándolo con la sustentabilidad en la Tierra, “asegurando que toda la humanidad pueda continuar usando el espacio ultraterrestre con fines pacíficos y de beneficio socioeconómico ahora y a largo plazo” (Chrysaki, 2020). Resulta interesante como introduce la idea de actividades a largo plazo y luego evalúa el ordenamiento jurídico espacial actual para sustentarlas

argumentando que el OST está orientado solo a los Estados signatarios, dejando espacio para la interpretación de la industria espacial comercial que utiliza recursos espaciales.

La sustentabilidad a largo plazo requiere que aprovechemos los recursos sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para aprovechar los mismos recursos. La contaminación espacial es un problema que se agrava a sí mismo a largo plazo; por lo tanto, el enfoque de Chrysaki (2020) para proponer un Código de conducta voluntario y no vinculante legalmente para la sostenibilidad espacial está bien orientado. Sin embargo, en acuerdo con Froehlich (2019) y Tapio et al. (2019), los instrumentos legalmente no vinculantes como el Código de Conducta Voluntario, aunque llenan los vacíos legales, pueden impulsar adecuadamente la industria espacial comercial y la mitigación de desechos espaciales. Al respecto, Tapio et al. (2019) argumentan que los instrumentos jurídicamente no vinculantes no son suficientes para garantizar que los actores de la navegación espacial se ciñan a ellos. También analizan el efecto en varios grados de los niveles de leyes blandas, argumentando que su implementación no es obligatoria a nivel nacional. Así, cualquier Estado puede decidir libremente cumplir, eliminar, modificar contenidos existentes o agregar nuevos contenidos. Tapio et al. (2019) también argumentan que los instrumentos jurídicamente no vinculantes, debido a su naturaleza voluntaria, resaltan la incertidumbre sobre cómo y si es que implementarán. Froehlich (2019) analiza la necesidad de eliminar los desechos espaciales

orbitales para lograr la sostenibilidad espacial, teniendo en cuenta los recursos espaciales limitados. Alberts (2019) identificó que las leyes vinculantes no se están desarrollando lo suficientemente rápido. Sin embargo, las leyes blandas podrían ser herramientas adecuadas para brindar claridad entre los actores espaciales involucrados en la mitigación y reducción de desechos espaciales en ausencia de certeza de la ley espacial, dado que una industria espacial comercial en rápido movimiento no detendrá sus actividades espaciales a pesar de la brecha legal (Froehlich, 2019). Desde una perspectiva macro, el Dr. See (2017) analiza las implicaciones de los instrumentos jurídicamente no vinculantes, identificando los riesgos potenciales debido a las intervenciones históricas de los Estados en la protección y defensa de los intereses nacionales, trayendo el dominio militar a la discusión. Cada vez que los intereses nacionales están en riesgo, un país puede decidir defenderlos militarmente.

Tradicionalmente, esta defensa ocurre en el dominio terrestre, marítimo y aéreo. Ahora, el espacio y el ciberespacio se consideran otros dominios de empleo militar. Está comprobado que las armas militares, como los ASAT y los misiles balísticos intercontinentales, pueden generar una nube sustancial de desechos espaciales. Por lo tanto, tener una guerra en el espacio en nombre de los intereses nacionales podría conducir potencialmente a un entorno de desechos espaciales agravado.

INDUSTRIA ESPACIAL COMERCIAL

Inicialmente, las actividades espaciales se centraron en llevar a un ser humano al espacio y luego a la Luna. El mercado estaba dirigido por el gobierno; por lo tanto, la Ley del Espacio y otros tratados se desarrollaron en consecuencia para proporcionar a los Estados signatarios un conjunto de normas y reglamentos para garantizar el uso pacífico del espacio, protegiendo a la humanidad de las armas de destrucción masiva en el espacio. Sin embargo, la historia demostró un cambio de programas espaciales orientados por el gobierno a programas e iniciativas espaciales comerciales y privadas. La apertura del mercado espacial a la participación privada y comercial trajo más competencia, costos reducidos y tecnologías mejoradas. La miniaturización de los componentes condujo a mejores capacidades de lanzamiento, es decir, mejoraron los propulsores de cohetes y las capacidades de carga útil. Además, la miniaturización condujo a satélites más pequeños, lo que facilitó el lanzamiento de múltiples naves espaciales en órbita y permitió la entrada de nuevos actores en el mercado espacial. Los actores comerciales y privados más nuevos, a su vez, aumentaron la competencia, redujeron los costos y ofrecieron varios modelos comerciales (Paikowsky, Baram y Ben-Israel, 2016).

Paikowsky et al. (2016), entregan una descripción general holística y geopolítica identificando las principales tendencias en las actividades espaciales impulsadas por el Estado, destacando la relevancia de la cooperación internacional, las tendencias en los vuelos espaciales tripulados, pero, lo que

es más interesante, colocando sobre la mesa una discusión sobre la seguridad espacial y la sostenibilidad. Como se discutió anteriormente, la sostenibilidad requiere que los actores espaciales colaboren y sigan un conjunto común de reglas para garantizar un entorno espacial más seguro para las generaciones futuras. Al respecto, Paikowsky et al. (2016) argumentan sobre el Código Internacional de Conducta (ICC) para Actividades Espaciales destacando su relevancia en el establecimiento de estándares y regulaciones contra los desechos espaciales. Además, Paikowsky et al. (2016) identifican que la mayoría de los nuevos actores espaciales son inversionistas privados y comerciales y, por lo tanto, ofrecen modelos de desarrollo y negocios diferentes a los enfoques tradicionales. Las iniciativas privadas y comerciales como, por ejemplo, la megaconstelación Starlink de SpaceX cambiarían significativamente la estructura de las actividades espaciales (Paikowsky et al., 2016).

La sostenibilidad a largo plazo es esencial para garantizar la ciencia, la tecnología y la innovación. Undseth, Jolly y Olivari (2020) introdujeron el problema de los desechos espaciales orbitales para analizar los desafíos de sostenibilidad para las actividades espaciales actuales y futuras. Identifican el uso incrementado de LEO para aplicaciones institucionales y comerciales y esperan una tasa de crecimiento acelerada en las próximas décadas (Undseth et al., 2020). Al evaluar los costos y riesgos asociados que los desechos espaciales representan para las naves espaciales y los desafíos legales y tecnológicos

de los sistemas activos de eliminación de desechos, Undseth et al. (2020) concluyeron que los desechos espaciales son un peligro espacial relevante que amenaza a la industria espacial comercial. Además, estiman que los desechos espaciales impactarán: 1) los satélites de observación meteorológica, lo que afectará nuestras capacidades de pronóstico, 2) la pérdida de vidas humanas en el espacio, 3) la interrupción de las observaciones de series temporales de la Tierra, que son esenciales para las ciencias de la tierra y la investigación climática, y 4) pérdida de los servicios de comunicación LEO ubicados cerca de las concentraciones más altas de desechos espaciales (Undseth et al., 2020). En total, argumentan que los desechos espaciales pueden afectar el crecimiento económico y la inversión en el sector espacial.

Se espera que las constelaciones de satélites crezcan en las próximas décadas, especialmente dentro de los mercados de las comunicaciones y de la observación de la Tierra y del espacio. Curzi et al. (2020) esperan que la suma acumulada de satélites en órbita supere los 8.000 para 2024. Así mismo, se espera que la megaconstelación SpaceX Starlink domine la parte inferior de la órbita terrestre por debajo de los 600 km (McDowell, 2020). Recientemente, SpaceX solicitó hasta 30 mil satélites adicionales además de los 12 mil ya autorizados (Henry, 2019). Aproximadamente 42.000 satélites estarán en la órbita LEO entre el segmento de altitud de 330 km y 570 km (Space Exploration Holdings, 2020). Aunque SpaceX parece ser el proyecto de constelación más importante, la constelación de satélites Kongsberg de

Noruega espera lanzar 900 satélites por año entre 2020 y 2028 (KSAT, 2019) hasta 8.100 satélites adicionales en LEO en la próxima década. OneWeb, la compañía de comunicaciones del Reino Unido (UK) recientemente comprada de la quiebra por el gobierno británico, tiene la intención de lanzar hasta 672 satélites en LEO para proporcionar conectividad global a Internet (Space Daily Staff Writers, 2020). Sin embargo, el proyecto original de la compañía tiene la intención de lanzar hasta 48.000 satélites a la órbita LEO, creciendo más que la megaconstelación SpaceX Starlink (Dowd, 2020). En este contexto, Undseth et al. (2020) apoyan que existen desafíos de ciencia, tecnología e innovación para el futuro en relación con la mitigación y remediación de desechos espaciales. Con constelaciones tan masivas en LEO, los sistemas de alerta de la situación espacial necesitarán un mayor desarrollo para garantizar capacidades de respuesta y análisis, así como de tecnologías de desorbitación para mejorar e implementar sus medidas y técnicas pasivas y activas (Undseth et al., 2020). Por lo tanto, la cooperación internacional es fundamental para detectar, identificar, monitorear y actualizar, además de los objetos espaciales funcionales, la creciente población de desechos espaciales (Kaiser, 2015). La gestión del tráfico espacial aparece como un componente fundamental en la próxima década o más, considerando la cantidad de satélites esperados. Las constelaciones gigantes cambiarán la forma en que se manejan las operaciones espaciales al optimizar el seguimiento automático de satélites y la detección de fallas (Curzi et al., 2020).

Estas megaconstelaciones cambiarían la estructura de las actividades espaciales en materia de seguridad y sostenibilidad espacial Paikowsky (2016), especialmente cuando estas constelaciones deben coexistir con basura espacial y otras actividades espaciales como el turismo espacial. En este contexto, Goehlich (2014) ofrece un análisis holístico profundo que incluye cuestiones sociales, institucionales y financieras, y hace hincapié en que la creciente contaminación espacial generará problemas de seguridad con efectos indudablemente adversos en la economía espacial. Al respecto, Undseth et al. (2020) identificaron una lista no exhaustiva de impactos potenciales relacionados con los desechos espaciales. En una población espacial en crecimiento, los costos relacionados con el diseño, la operación, el seguro y la limpieza de la órbita podrían aumentar con la población de desechos espaciales (Undseth et al., 2020), que, en contraste con Adilov et al. (2015), el peor de los casos puede inutilizar algunas órbitas debido a la continua generación de desechos espaciales autopropagantes. Por consiguiente, con un efecto adverso significativo en el crecimiento económico espacial (Undseth et al., 2020).

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La literatura sugiere y apoya que la basura espacial es un problema creciente. Aunque se esparce por todas las órbitas, la basura espacial se concentra principalmente en LEO entre 500 km y 1.400 km. Las capacidades de rastreo actuales sólo permiten detectar y monitorear aproximadamente más del 0,01%

del total de desechos espaciales acumulados. Sin duda, estos números requieren acción inmediata y colaboración internacional. Además, un mercado en crecimiento para la industria espacial comercial llevaría a las empresas a comportarse como empresas competitivas, por ejemplo, SpaceX, KSAT y OneWeb, lanzando miles de satélites en LEO para maximizar sus resultados esperados. De hecho, la capacidad de las franjas horarias LEO permite la coexistencia de tales megaconstelaciones; sin embargo, también tienen que coexistir con millones de objetos de desechos espaciales. Incluso una pieza insignificante de unos pocos milímetros que viaja a 13 km/s puede causar daños desde severos a catastróficos. De acuerdo con los autores revisados, las empresas competitivas agravarían el problema de los desechos espaciales porque al mezclar constelaciones de satélites masivos con desechos espaciales mientras se aplica el síndrome de Kessler, el resultado final será innegablemente más desechos espaciales.

El derecho espacial y otros tratados reguladores no abordan el problema de los desechos espaciales. Solo el Código de Conducta Internacional voluntario logra coordinar a los actores espaciales para considerar estrategias de mitigación y remediación. Sin embargo, este código está lejos de ser legalmente vinculante. Por lo tanto, no existe ningún impedimento legal para que la industria espacial comercial se comporte precisamente como Adilov et al. (2015; 2018; 2020). De hecho, las regulaciones y los modelos comerciales tienden inequívocamente a un escenario de

autodestrucción, en el que la sostenibilidad del espacio estará en juego. En este sentido, el síndrome de Kessler explica claramente el problema de la basura espacial autopropagante; Resulta interesante considerar como este síndrome también puede explicar cómo se comportan los modelos de negocio, considerando que las empresas competitivas tenderían a aumentar sus lanzamientos para aumentar sus beneficios. Tanto los desechos espaciales como los modelos comerciales competitivos se comportan como modelos que se propagan y se refuerzan a sí mismos. El problema con estos modelos coexistentes es que no logran ser compatibles. Más lanzamientos, con el tiempo, crearán más desechos espaciales, lo que, a su vez, requerirá más lanzamientos y, por lo tanto, aumentará la probabilidad de crear más desechos espaciales. Por lo tanto, se dará paso a un ciclo degenerativo a menos que se implementen y apliquen estrategias de mitigación y eliminación activa. Desafortunadamente, todavía no existe un marco regulatorio legalmente vinculante para la industria espacial comercial. Sin embargo, el problema se deja en manos de los gobiernos y las intenciones éticas de las compañías espaciales gigantes para comprender, aceptar y enfrentar el desafío de reducir activamente los desechos espaciales y mitigar su creación debido a sus operaciones espaciales. La sostenibilidad de los entornos espaciales y de la superficie de la Tierra depende en gran medida de la responsabilidad que se transfiera a los operadores espaciales.

Aunque hay iniciativas globales de concienciación sobre la situación espacial e

iniciativas de limpieza activa del espacio en desarrollo como CleanSpace-1 de ESA (ESA, 2019), RemoveDEBRIS (Forshaw et al., 2016) y Deorbiter CubeSat (Hakima, Bazzocchi y Emami, 2018), estos todavía están bajo investigación y desarrollo. Las pautas de mitigación del Comité de Coordinación Interagencial de Desechos (IADC) ayudan a controlar una mayor generación de desechos espaciales; sin embargo, no ayudan a limpiar el espacio alrededor de la Tierra inmediatamente, retrasando la salida de órbita del satélite, activa o pasiva, durante 25 años. Además, estas directrices no previenen ni protegen a una nave espacial de una colisión con desechos espaciales en órbita. En total, coincidiendo con Undseth et al. (2020), si bien el ICC voluntario parece adecuado como solución temporal, no existen medidas de control de cumplimiento adecuadas. El ICC aún depende de los datos de los operadores de satélites y, tecnológicamente, el sistema no puede rastrear desechos más pequeños, mientras que el lanzamiento de múltiples satélites sólo complica las cosas. Finalmente, ¿cuál sería el impacto teórico potencial de los desechos espaciales orbitales en la industria espacial comercial? Tras el efecto de colisión en cascada, los desechos espaciales se autopropagarán sin ayuda humana y, por lo tanto, aumentarán la probabilidad de colisión con naves espaciales en funcionamiento y otros desechos espaciales. Si no se implementan y hacen cumplir medidas activas, este efecto podría desincentivar actividades espaciales como el turismo espacial. Por el contrario, bajo empresas competitivas, los desechos espaciales podrían desencadenar un efecto similar en las

empresas y lanzamientos espaciales, dando lugar a un ciclo autodegenerativo en el que solo prevalecerá la empresa más fuerte.

CONCLUSIÓN

Este documento presentó una breve descripción de la literatura sobre los efectos de los desechos espaciales en la industria espacial comercial. La literatura sugiere que los desechos espaciales sólo empeorarán a menos que se implementen medidas activas de reducción. Además, la generación de desechos espaciales se deja en manos del gobierno y la industria espacial con buenas intenciones sin instrumentos jurídicamente vinculantes. Se observó además, que las empresas competitivas siguen el mismo patrón que los desechos espaciales, es decir, cuantos más lanzamientos, más ganancias, por lo tanto, más lanzamientos, generando, a su vez, más desechos espaciales. La sostenibilidad del espacio depende de los actores de la navegación espacial. Por lo tanto, un entorno espacial inseguro los afectará significativamente, especialmente a los de la industria espacial comercial.

SOBRE EL AUTOR

Oficial General en retiro de la Fuerza Aérea de Chile, Ingeniero en Ejecución en Sistemas Aeronáuticos con mención Piloto de Guerra. Magister en Ciencias en Sistemas no Tripulados con mención en Sistemas Espaciales. Con vasta experiencia en gestión logística, gestión de capital humano, y gestión de proyectos de innovación y desarrollo. Especialista en Inteligencia, experto en análisis y planificación estratégica y operacional.

REFERENCIAS

- Adilov, N., Adilov, N., Alexander, P. J., Alexander, P. J., Cunningham, B. M., & Cunningham, B. M. (2015). An economic analysis of earth orbit pollution. *Environmental and Resource Economics*, 60(1), 81-98. <https://dx.doi.org/10.1007/s10640-013-9758-4>
- Adilov, N., Alexander, P. J., & Cunningham, B. M. (2018). An economic “Kessler syndrome”: A dynamic model of earth orbit debris. *Economics Letters*, 166, 79-82. <https://dx.doi.org/10.1016/j.econlet.2018.02.025>
- Adilov, N., Alexander, P. J., & Cunningham, B. M. (2020). The economics of orbital debris generation, accumulation, mitigation, and remediation. *Journal of Space Safety Engineering*, <https://dx.doi.org/10.1016/j.jsse.2020.07.016>
- Alberts, A. (2019). The degree of the lack of regulation of space debris within the current spacelaw regime and suggestions for a prospective legal framework and technological interventions. *Space security and legal aspects of active debris removal* (pp. 93-106) Springer.
- Arnas, D., Lifson, M., Linares, R., & Avenda, M. (2020). Low earth orbit slotting for spacetraffic management using flower constellation theory. *Paper presented at the Space Situational Awareness, Conjunction Analysis, and Collision Avoidance II*, <http://dx.doi.org/10.2514/6.2020-0721>
- Arnas, D., Lifson, M., Linares, R., & Avendaño, M. E. (2020). Definition of low earth orbit slotting architectures using 2D lattice flower constellations. *Advances in Space Research*, <https://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.021>
- Chrysiaki, M. (2020). The sustainable commercialization of space: The case for a voluntary code of conduct for the space industry. *Space Policy*, 52, 101375. <https://dx.doi.org/10.1016/j.spacepol.2020.101375>
- Curzi, G., Modenini, D., & Tortora, P. (2020). Large constellations of small satellites: A survey of near future challenges and missions. *Aerospace*, 7(9), 133. <https://dx.doi.org/10.3390/aerospace7090133>

- Dowd, K. (2020). *OneWeb seeks to increase satellite constellation up to 48,000 satellites, bringing maximum flexibility to meet future growth and demand* [Website]. OneWeb.com, <https://www.oneweb.world/media-center/oneweb-seeks-to-increase-satellite-constellation-up-to-48000-satellites-bringing-maximum-flexibility-to-meet-future-growth-and-demand>
- Drmola, J., & Hubik, T. (2018). Kessler syndrome: System dynamics model. *Space Policy*, 44-45, 29-39. <https://dx.doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.03.003>
- ESA. (2019). *ESA commissions world's first space debris removal* [Website]. The European Space Agency, https://www.esa.int/Safety_Security/Clean_Space/ESA_commissions_world_s_first_space_debris_removal
- ESA. (2020). *Space debris by the numbers* [Website]. The European Space Agency, https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers
- ESA Space Debris Office. (2020). *ESA's annual space environment report*. Germany: ESA Space Operations Centre, https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf
- Forshaw, J. L., Aglietti, G. S., Navarathinam, N., Kadhem, H., Salmon, T., Pisseloup, A., . . . Steyn, W. H. (2016). RemoveDEBRIS: An in-orbit active debris removal demonstration mission. *Acta Astronautica*, 127, 448-463. <https://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.06.018>
- Froehlich, A. (2019). *Space security and legal aspects of active debris removal* (1st 2019. ed.). Cham: Springer International Publishing, <https://link.springer-com.ezproxy.libproxy.db.erau.edu/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-90338-5.pdf>
- Goehlich, R. A. (2014). Space tourism: Hurdles and hopes. *International Journal of Aviation Systems, Operations and Training (IJASOT)*, 1(1), 17-34. <https://dx.doi.org/10.4018/ijasot.2014010103>
- Hakima, H., Bazzocchi, M. C. F., & Emami, M. R. (2018). A deorbiter CubeSat for active orbital debris removal. *Advances in Space Research*, 61(9), 2377-2392. <https://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2018.02.021>

- Henry, C. (2019). *SpaceX submits paperwork for 30,000 more Starlink satellites* [Website]. SpaceNews.Com, <https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>
- Horstmann, A., Kebschull, C., Müller, S., Gamper, E., Hesselbach, S., Soggeberg, K., . . . EnricoStoll. (2018). Survey of the current activities in the field of modeling the space debris environment at TU Braunschweig. *Aerospace*, 5(2), 37. <https://dx.doi.org/10.3390/aerospace5020037>
- Kaiser, S. A. (2015). Legal and policy aspects of space situational awareness. *Space Policy*, 31,5-12. <https://dx.doi.org/10.1016/j.spacepol.2014.11.002>
- KSAT. (2019). *KSAT annual report 2019* [Website]. <https://www.ksat.no/globalassets/ksat/files/Annual-report-2019>
- Le May, S., Gehly, S., Carter, B. A., & Flegel, S. (2018). Space debris collision probability analysis for proposed global broadband constellations. *Acta Astronautica*, 151, 445-455. <https://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.036>
- Mason, J., Stupl, J., Marshall, W., & Levit, C. (2011). Orbital debris–debris collision avoidance. *Advances in Space Research*, 48(10), 1643-1655. <https://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.08.005>
- McDowell, J. C. (2020). The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceXStarlink constellation. *Astrophysical Journal Letters*, 892(2), L36. <https://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ab8016>
- Murtaza, A., Pirzada, S. J. H., Xu, T., & Jianwei, L. (2020). Orbital debris threat for space sustainability and way forward (review article). *IEEE Access*, 8, 61000-61019. <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979505>
- Paikowsky, D., Baram, G., & Ben-Israel, I. (2016). Trends in space activities in 2014: The significance of the space activities of governments. *Acta Astronautica*, 118, 187-198. <https://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.10.007>

See, E. T. (2017). Commercialization of space activities - the laws and implications. *The Journal of Air Law and Commerce*, 82(1), 145. [https://advance-lexis-com.ezproxy.libproxy.db.erau.edu/api/document?collection=analytical-materials&id=urn:contentItem:5PMC-1MW0-00CW-H07F-00000-00&context=1516831](https://advance.lexis-com.ezproxy.libproxy.db.erau.edu/api/document?collection=analytical-materials&id=urn:contentItem:5PMC-1MW0-00CW-H07F-00000-00&context=1516831)

Space Daily Staff Writers. (2020). *UK's OneWeb resumes satellite production after bankruptcy [Website]*. Spacedaily.com, https://www.spacedaily.com/reports/UKs_OneWeb_resumes_satellite_production_after_bankruptcy_999.html

Space environment statistics. (2020). The Space Debris User Portal, <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>

Space Exploration Holdings, L. (2020). Report WR07 - SAT-MOD-20200417-00037. https://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATMOD2020041700037&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number

Tapio, J., & Soucek, A. (2019). National implementation of non-legally binding instruments: Managing uncertainty in space law? *Air and Space Law*, 44(6), 565-582. <https://kluwerlawonline-com.ezproxy.libproxy.db.erau.edu/api/Product/CitationPDFURL?file=Journals\AILA\AILA2019035.pdf>

Resolution 2222 (XXI) Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and other celestial bodies. (1966). https://www.unoosa.org/pdf/gares/ARES_21_2222E.pdf

UN COPUOS. (1999). *Technical report on space debris [Website]*. New York: The United Nations: Scientific and Technical Subcommittee of the United Nations Committee on the Peaceful Use of Outer Space. https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/un_report_on_space_debris99.pdf

Undseth, M., Jolly, C., & Olivari, M. (2020). Space sustainability: The economics of space debris in perspective. *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, (87) Retrieved from <https://doi.org/10.1787/a339de43-en>



UNOOSA. (2019). *Space law treaties and principles [Website]*. The United Nations Office for Outer Space Affairs, <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties.html>

US National Research Council, US National Research Council Division on Engineering and Physical Sciences, US National Research Council Committee for the Assessment of NASA's Orbital Debris Programs, US National Research Council Aeronautics and Space Engineering Board, Committee for the Assessment of NASA's Orbital Debris Programs, Aeronautics and Space Engineering Board, . . . Division on Engineering and Physical Sciences. (2012). *Limiting future collision risk to spacecraft: An assessment of NASA's meteoroid and orbital debris programs*. Washington, D.C: National Academies Press. <https://dx.doi.org/10.17226/13244>