

Lurrean harrapatuta: zabor espaziala eta misio espazialen etorkizuna

Jakina da Ilargia dela gure planetaren inguruan orbitatzen duen satellite natural bakarra, baina badaude beste satellite asko ere, gizakiok bidalitakoak, satellite artifizialak alegia. Telekomunikazioak, meteorologia, espioitza... zenbatezinak dira gailu horien erabilerak. Baina zer gertatzen da satellite artifizial horiek guztiak heriotzara heltzen direnean? *Murritu, birziklatu, berrerabili* leloak ez du balio espazioan. *Gravity* (2013) filmak, bere garaian, plazaratu zituen zerua zabor espazialez beterik izateak dakartzan arriskuak. Bertan, satelliteen talkaren ondorioz, satelliteak milaka zati txikitan zatitu ziren (mikrometeoroiden deituak), eta abiadura handian orbitatzen hasi ziren, eta Sandra Bullock-i buruhauste izugarriak sortu zitzaizkion Lurrera itzultzeko. Zientzia-fikziotik at, mikrometeoroiden horiek ugartzeak larritu egin du sektore espaziala (1. irudia). Zer gertatuko litzateke egun batean meteoroiden dentsitateak balio kritikoa lortuko balu, Lurretik kalterik gabe atera ahal izateko handiegia?

Arazo hipotetiko horri Kessler sindromea deritzogu, Donald Kessler eta Burton Cour-Palais-ek 1978an proposatua. Ikertzaileek kalkulatu zuten zabor espazialen arteko talken ondorioz sor daitezkeen zaborren kantitatea. Haien ereduak kate-erreakzioaren dentsitate kritikoa bat iragarri zuen, non mikrometeoroiden hazkundea esponontzial bihurtzen baita (bonba nuklearra balitz bezala). Behin puntu hori igarota, zerua zaborrez beteko litzateke, eta gizakiok betiko Lurrean gelditzera behartuta gendeke. Dena den, kalkulu horrek des-

kribatzen duen egoerara ez gara heldu orain arte, baina joera azkar aldatzen ari da. *Komunen tragedia* dilemaren adibide berri batean, espaziora bidalitako objektuen kopurua ez da murrizten ari, areagotzen baizik, batez ere Space X-en Starlink bezalako megaproiektuek bultzatuta. Beraz, hori guztia kontuan izanda, badirudi oso litekeena dela Kesslerren iragarpena errealitate bihurtzea. Artikulu honen bidez, arazo horren bideragarritasuna aztertzen saiatuko gara gaur egungo iragarpenez baliatuz.

Arazoaren larritasuna aztertzen

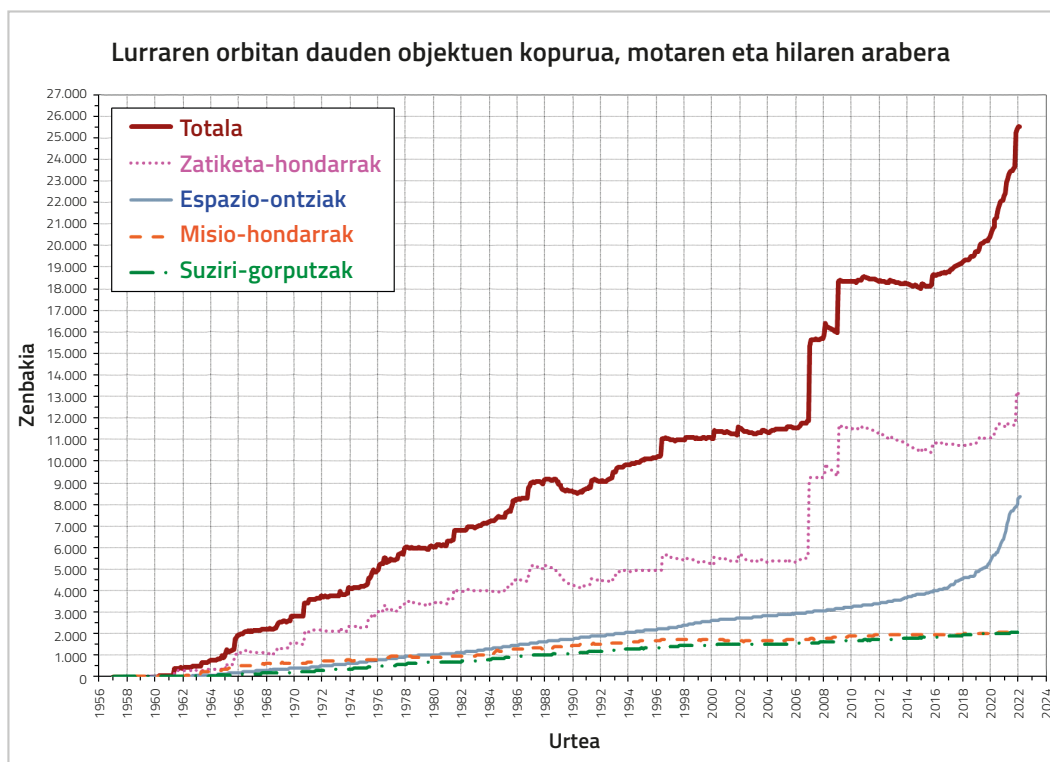
Lurreko barnealdea bezala, kanpoaldea ere geruzatan banatzen dugu. Lurraren atmosferatik Van Allen-en gerrikora dagoen tarteari beheko lur-orbita edo LEO deritzogu (ingelesez, *Low Earth Orbit*), eta gutxi gorabehera lurrazaletik 2.000 km-ra kokatzen da. Orbita horretan aurkitzen diren hondakinen erdiak bi talkak eragindakoak dira: ASAT probakoa (Txinak 2007an egin zuena, satelliteak lehertzeko misil bidez) eta Kosmos 2251-ren eta Iridium 33-ren artekoa. LEO osoan, 22.936 objektu zenbatu zituen *US Space Force* 2022an (2. irudia). Hala ere, kopuru hori izugarri gutxietsita dago: Europako Espazio Agentziak estimatu du 1 mm-tik gorako 130 milioi objektu daudela LEOan.

Askoz urrutiago, 35,786 km-ra, orbita geosinkronoa (GEO) dago. Orbita horretako objektuak Lurraren errotazioarekiko modu proportzionalan mugitzen dira, eta, beraz, beti agertzen dira zeruaren puntu berean gure ikuspuntutik. Hori funtsezkoa

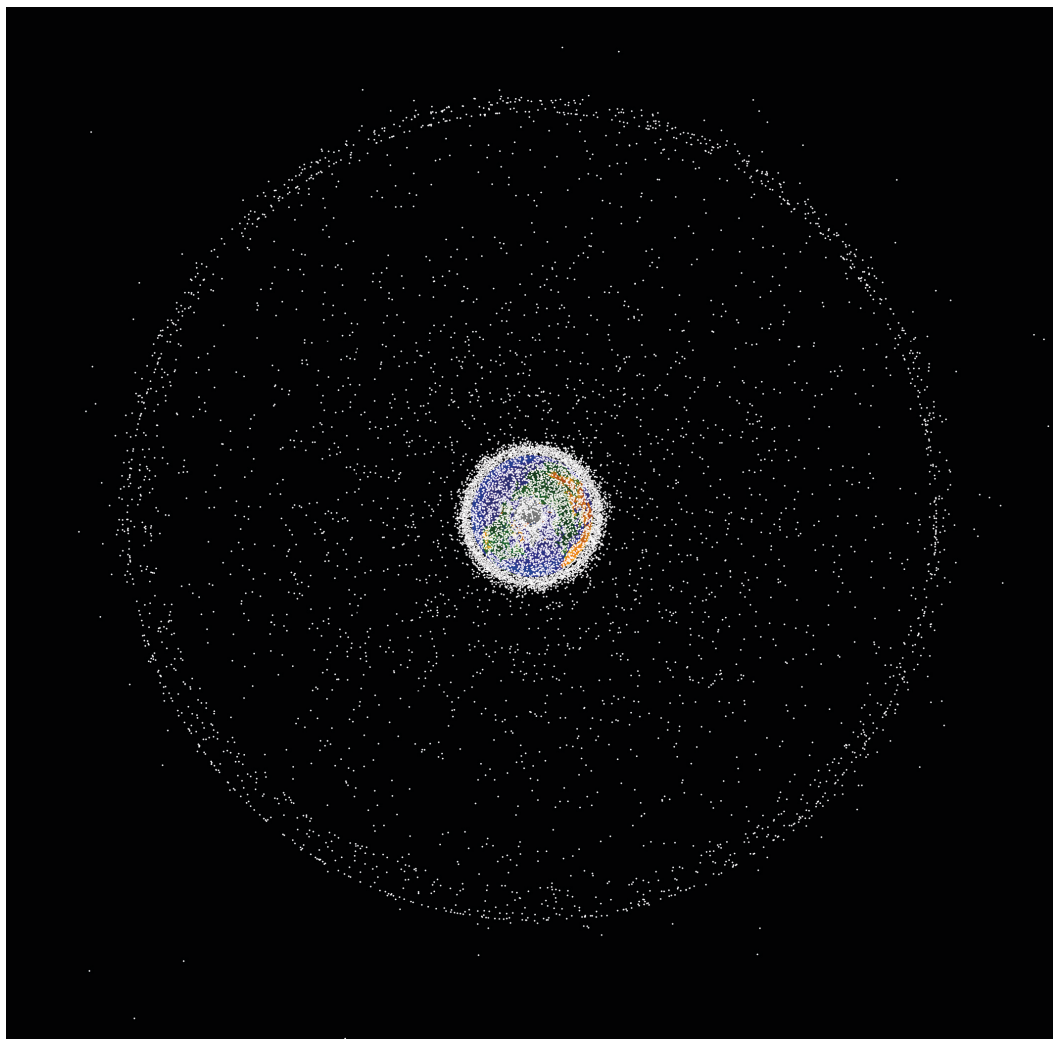
da komunikazio-sateliteentzat eta klima monitorizatzeko sateliteentzat, haien posizioak une oro kontrolpean izatea ahalbidetzen baitu. Era berean, aukera ematen dute beste satelite batzuetarako erreferentzia-puntu finkoak ezartzeko, hala nola GPSak, zeinek Lurretik gertuago orbitatzen baitute baina posizioen trazabilitatea ziurtatu behar baitute. 2. irudian ikus daitezke orbita-motak: Lurretik gertuko hodeiari LEO deitzen zaio; kanpoaldean ongi markatuta ikusten den eraztuna, berriz, GEO da. Bien artean erdiko orbita dago (MEO), eta hor nabigazio globaleko sistemak daude, hala nola GPSarenak. Azkenik, orbita geosinkronotik kanpo dauden puntu gutxi ikusten dira, hilerria izeneko or-

bitetan. Orbita horietan, bizitza operatiboa amaitu duten sateliteak uzten dira, GEO orbitan traba egin ez dezaten.

Orbiten ezaugarriak oso garrantzitsuak dira zabor espazialaren egoera ulertzeko. Mota bakoitzaren alderdi teknikoak alde batera utzita, airearen marruskadura-mailan ere oso desberdinak dira. Fenomeno horri narriadura orbitala deritzogu, eta Lurreko orbitan dauden gorputz guztiek nabaritzen dute. LEO orbitako narriadura nabarmena da, eta hor dauden sateliteek propulsaizaileak behar dituzte orbitan mantentzeko. Beraz, beheko lur-orbitako zaborra gure atmosferara sartuko da berriz



1. irudia. Lurraren inguruan orbitatzen duten objektuen kopurua, jatorriaren arabera sailkatuta. Txinako sateliteen aurkako armaren proba (2007) argi ikusten da, baita Iridium 33 eta Kosmos 2251-ren arteko talka (2009) ere. 2016tik aurrera, esponentzialki hazi da sateliteen kopurua. Jatorria: NASA ODPO.



2. irudia. NASAk monitorizatutako orbitan dauden objektuen posizioen ikuspegia. Puntuen % 95 zabor espazialari dagozkio. Jatorria: NASA ODPO.

25 urteko epean, gutxi gorabehera. Orbita geosinkronoan, ordea, gasen dentsitatea oso arina da, eta zabor espazialaren gainbehera askoz mantsagoa da. Horrek esan nahi du sateliteen gainpopulazioa eta zabor espazialaren sorkuntza kudeatzea askoz zailagoa izango dela orbita garrantzitsu horretan.

Dena den, eta Kesslerrek aurreikusi ez bezala, soilik behin (2009an) gertatu da satelite handien arteko talka. Datuak aztertuz, badirudi kalkuluek gehiegi balioetsi dutela mota horretako talka bat gertatzeko probabilitatea. Zabor espaziala sortzeko modu nagusia denez, askok uste dute gure plane-

tan harrapatuta gelditzearen beldurra bidegabea dela. Hala eta guztiz ere, aurretik aipaturikoak *business-as-usual* egoera soilik deskribatzen du, eta ez dago bermatuta egoera horrek jarraituko duela. Izan ere, azken hamarkadan asko hazi da espazio-ontzi kopurua, 1. irudian ikusi ahal izan dugun bezala. Bai beheko lur-orbitako militarizazioak bai Starlink bezalako proposamenek aurrekari kezka-garria ezartzen dute, zeina hurrengo atalean aztertuko baitugu.

Espazioko partaide berriak:

Starlink, armadak...

Nahiz eta egungo egoerak larriegia ez dirudien, baditugu larriagotze-prozesu baten beldur izateko arrazoiak. Alde batetik, Indiak Txinaren pausoei jarraitu die, eta bere sateliteen aurkako arma probatu zuen 2019an. Badirudi Estatu Batuek sateliteen teknologia militarrean zuten monopolioa amaitzen ari dela, eta ez dira gutxi gatazka potentzialaren eszenatoki berri horretan parte hartu nahi duten armadak.

Bestalde, Elon Musk-en Starlink proiektuan proposatutakoa betetzen bada, 50.000 satelite berri izango ditugu gure planetaren inguruan orbitatzen, eta handiagoa izango da talka gertatzeko probabilitatea. Aurreko belaunaldietako komunikazio-sateliteak GEO orbitan kokatzen ziren, eta, beraz, haien seinaleek denbora gehiago behar zuten iristeko, eta ez zuten uzten Internet azkarra satelite bidez masiboki orokortzen. 2018ko azaroan, AEBko Gobernuak baimena eman zion Elon Muski 7.518 satelite LEOan martxan jartzeko. 2024ko otsailean, dagoeneko 5.289 Starlink satelite daude martxan, 2 milioi harpidedun baino gehiagorekin. Oraingoz, satelite-kopuruaren hazkunde masibo horrek ez du ekarri zaborraren hazkunde esanguratsurik, baina, joera horri jarraituz gero, badirudi denbora-kontua

dela Kesslerrek iragarritako zabor espazialaren kate-erreakzioa gertatzea.

Hain ospetsuak ez izan arren Starlink baino askoz handiagoak diren konstelazioentzako eskaerak ere jaso dira dagoeneko Telekomunikazioen Nazioarteko Batasunean; hala nola 337.000 satelitez osatutako Cinnamon 937 konstelazioa, Ruandak aurkeztutakoa. Mila satelitek gorako 90 konstelazio baino gehiagorentzako eskaerak daude, eta, eskaera guztiak kontuan hartuta, kalkulatu dute orbitan dauden satelite-kopurua 115 aldiz handituko litzatekeela.

Zer egin? Zaborraren kudeaketa aktiboa eta pasiboa

Puntu honetara helduta, argi dago momentuz ez dela posible zabor gutxiago sortzea, eta zaborra ezabatzeko proposamen asko egin dira. Ikusi dugunez, orbita-mota bakoitzeko kudeaketa-metodo desberdinak behar dira. Narriadura orbitala dela medio, LEOko zaborra nahiko azkar erortzen da Lurrera, baina hori ez da hain erraz gertatzen GEOko sateliteen kasuan, milaka urteko batez besteko bizitza baitute. Horregatik, orbita hori babestu ahal izateko, ezinbestekoa da ontzi horiek beste orbita batzuetara mugitzea, "hilerri-orbita" deritzenetara. Hala ere, hilerri-orbitak ere gainpopulazio-arazoa nabaritzen ari dira. Beraz, orbita garbitzeko teknologia aktiboak garatu dira.

Beste era batzuk ere proposatu dira zaborra biltzeko: arpoiak edo sareak baliatzea sateliteak berreskuratzeko, imanen bidez jasotzea edota laserrak erabiltzea satelitea berotzeko eta narriadura orbitala handitzeko. Zoritxarrez, proposamen gehienak literatura zientifikoan bakarrik aurkitu daitezke oraingoz, prototipo operatiborik gabe. Alabaina, aipatu behar dugu orain arte gehien garatu diren prototipoen artean ESAko diseinu bat dagoe-

la, ClearSpace-1 (3. irudia). Metodo horrek satelite-eta suziri-hondar handiak fisikoki harrapatuko ditu Lurrera erori baino lehen, eta 2025ean martxan jartzea espero da. Hala balitz, orbitak garbitzeko funtzionatzen duen lehen sistema izango litzateke, eta horrek erakutsiko luke oraindik garaiz gabiltzala hondamendi bat saihesteko.



3. irudia. ESAk eta ClearSpace-k diseinatutako ClearSpace-1 prototipoa, 2025erako planifikatua. Jatorria: ESA/Clearspace.

Badago kezkatzeko motiborik?

Zaila da aurreikustea epe luzera arazoaren tamaina zenbatekoa izango den, gobernuen, enpresa handien eta armaden espazioaren erabilera-planen mende baitago. Dena den, erabat argi gelditu da ezen, Lurreko zaborraren kudeaketa bezala, espa-

zioko zaborraren kudeaketa ere funtsezkoa izango dela. Sateliteen kopurua gorantz doan bitartean, igo egingo da talkak eta kate-erreakzioak izateko probabilitatea, eta batek daki zer ondorio ekarriko dituen horrek. Etorkizun hurbilean espaziorako misioekin jarraitzea posible bada ere, kostuen hazkundeak espazioaren ustiapena bideraezin bihur dezake, bai alderdi zientifikotik, bai alderdi komertzialetik. Komeni da hori ez ahaztea eta epe luzera espazioaz gozatzeko aukera arriskuan ez jartzea berehalako onura ekonomikoengatik. Aldaketa klimatikoaz 50 urte berandu hasi gara ohartzen, eta jada ondorio batzuk konpongaitezak dira. Ez diezaiegun utzi zabor espazialaren arazo hau gure hurrengo belaunaldiei, eta konpon dezagun berandu izan baino lehen. ●

Bibliografia

- [1] *Zientzia.eus*. (2014). Zabor espaziala. <https://zientzia.eus/artikuluak/zabor-espaziala/>
- [2] Wall, M. (2022). Kessler Syndrome and the space debris problem. <https://www.space.com/kessler-syndrome-space-debris>
- [3] United States Space Force (2023) – processed by Our World in Data: “Objects in space”. <https://ourworldindata.org/grapher/low-earth-orbits-objects>
- [4] Etxebeste, E. (2023). Sateliteen gorakadari eusteko beharraz ohartarazi dute. *Elhuyar* aldizkaria, 352.
- [5] McDowell, J. Starlink Launch Statistics. <https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>
- [6] Shan, M., Guo, J., & Gill, E. (2016). Review and comparison of active space debris capturing and removal methods. *Progress in Aerospace Sciences*, 80, 18-32.
- [7] 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.