

La polución electromagnética que viene del cielo Starlink y otros

Ing. Guillermo Defays, M.Sc.,¹ 2022

Primera parte: Los sistemas satelitales

1.1 - Las primeras formas de comunicación "vía satélite"

Los satélites artificiales de comunicaciones, nacieron en la década del '60 del siglo pasado², como forma de posibilitar la comunicación a largas distancias. Esto fue posible a partir del desarrollo de la tecnología espacial que, desde la década anterior, había permitido poner objetos en órbita alrededor de la Tierra³.

Hasta ese momento, la tele comunicación a grandes distancias⁴ por medio de ondas electromagnéticas⁵, había tenido que realizarse en ciertas y determinadas frecuencias, para poder aprovechar alguno de dos mecanismos naturales:

- El efecto de "guía de onda" entre la superficie de la Tierra y ciertas capas de la atmósfera, lo que provoca que las ondas se propaguen siguiendo el contorno terrestre.
- La reflexión de las ondas en la ionósfera, lo que permite que retornen a la Tierra en un punto alejado, más allá del horizonte⁶.

Estos mecanismos, dependen de las condiciones atmosféricas, el clima, la hora del día, la época del año, etc., por lo que su aprovechamiento, tiene ciertas limitaciones. Por eso, cuando se tuvo disponible la tecnología satelital, se trabajó para sustituir la comunicación ionosférica, haciendo que, el punto en el espacio donde las ondas cambiaran de dirección para retornar a la Tierra más allá del horizonte, fuera un satélite artificial, en lugar de la ionósfera.

Había, sin embargo, varias diferencias entre esas primeras comunicaciones vía satélite y la reflexión de las ondas en la ionósfera:

- Mientras la ionósfera se encuentra a algunos cientos de kilómetros sobre la superficie terrestre, los satélites de comunicaciones utilizados entonces, estaban a decenas de miles de kilómetros. Esto permitía cubrir mayores distancias en un "salto" simple Tierra/satélite/Tierra.

¹ Ingeniero Electricista con orientación Electrónica de la Universidad Nacional de Rosario (Argentina) y Master of Sciences en Sistemas de Telecomunicaciones de la Universidad de Essex (Inglaterra). Ha ocupado cargos gerenciales en ENTel y Telefónica Argentina SA así como de Profesor de Electromagnetismo de la Universidad Católica Argentina y Director del Instituto Profesional de Estudios e Investigación del Sindicato de Profesionales de las TIC. Actualmente se desempeña en la docencia terciaria en Buenos Aires y es Secretario de Previsión Social de la Central (Autónoma) de Trabajadores de la Argentina (CTA) de la Capital Federal.

² El primer satélite de comunicaciones, fue el denominado Telstar 1, lanzado en 1962, a partir de un acuerdo entre Estados Unidos, Francia e Inglaterra.

³ El primer satélite artificial fue el Sputnik 1, puesto en órbita por la Unión Soviética en 1957.

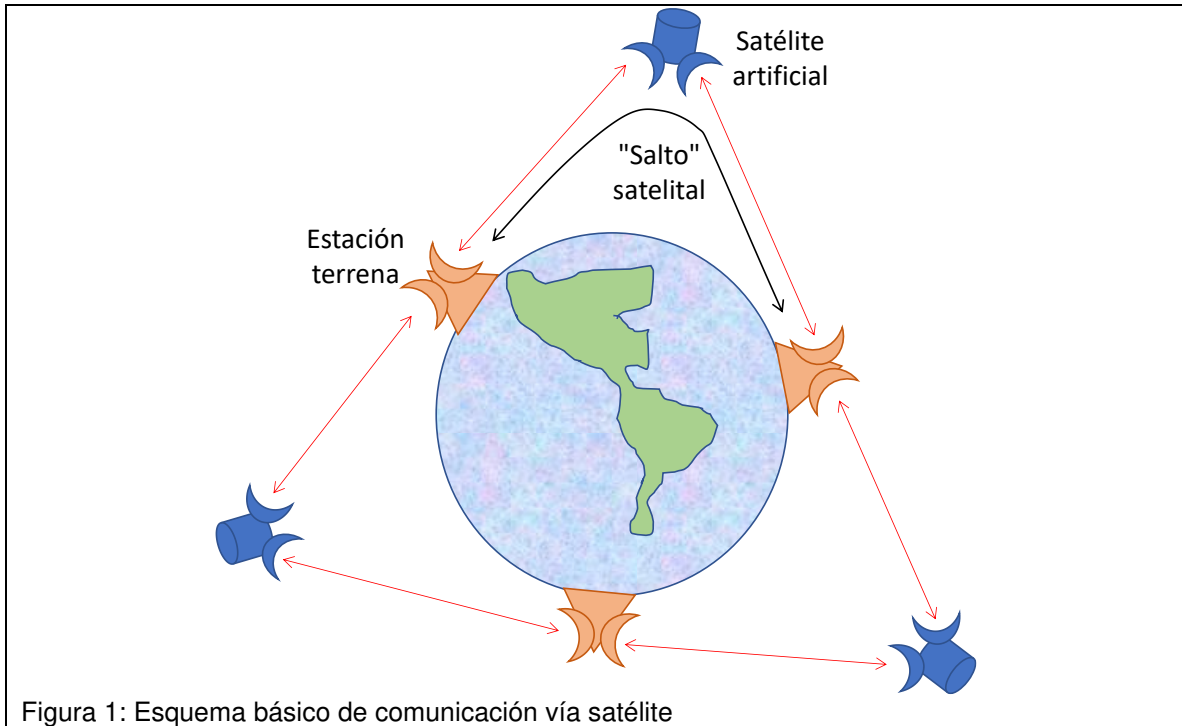
⁴ Es decir, "más allá del horizonte", dado que, las ondas electromagnéticas tienden a propagarse naturalmente, en línea recta.

⁵ Los términos: Ondas electromagnéticas, Campos electromagnéticos (CEM), Radiación electromagnética, Energía electromagnética, se utilizan en forma indistinta en la práctica, para referirse al mismo fenómeno.

⁶ Esto era lo que se conocía como "comunicación por onda corta".

- Las ondas no se reflejaban simplemente en el satélite artificial sino que, eran recibidas por éste, amplificadas y, vueltas a enviar a la Tierra

- Luego de un salto satelital, las ondas en la Tierra, podían volverse a amplificar en las "estaciones terrenas" y ser enviadas a un nuevo salto de satélite, para cubrir distancias mayores. De esta manera, dos puntos cualesquiera sobre la Tierra, podían estar comunicados a través de un máximo de dos saltos satelitales (ver figura 1)



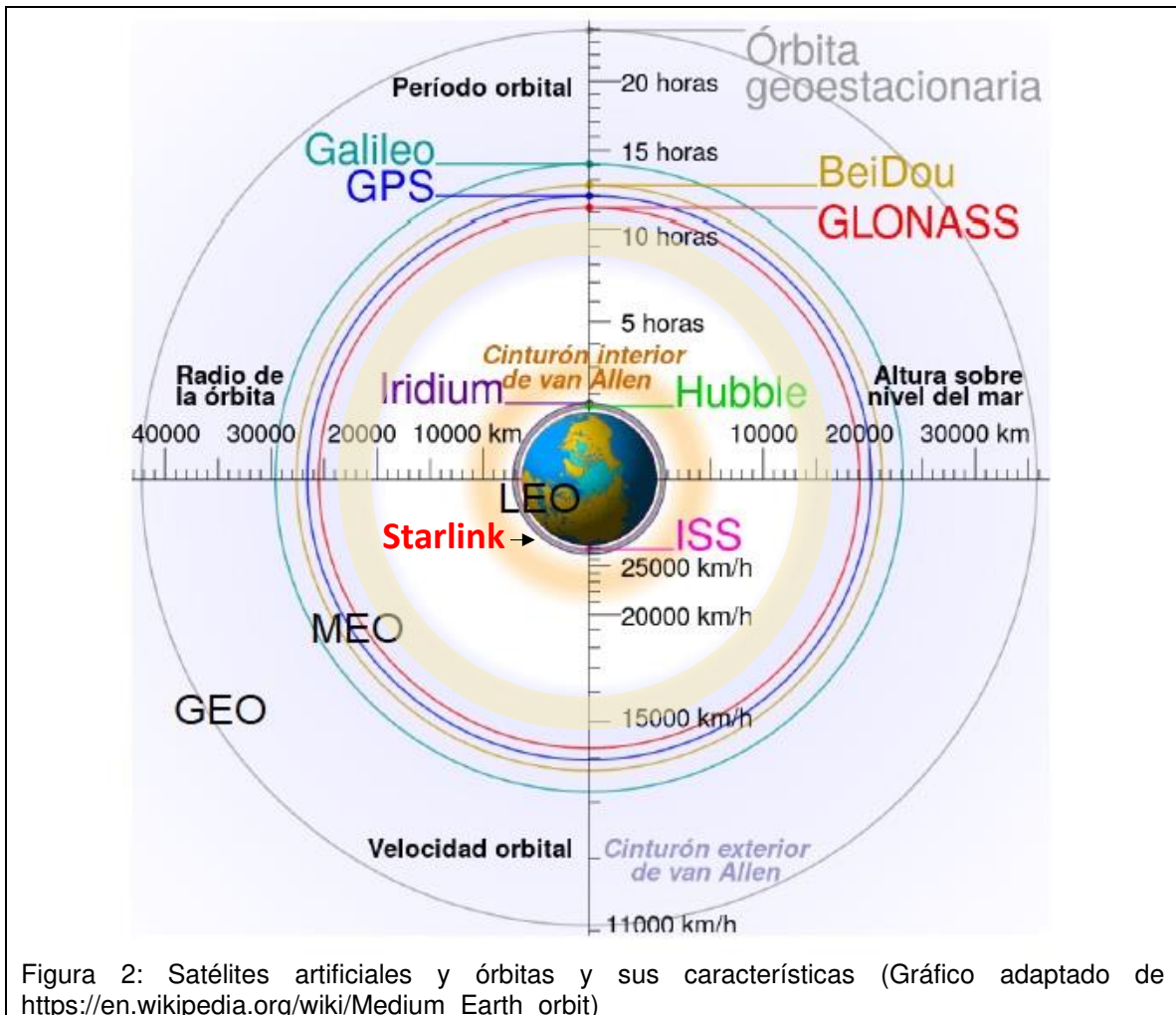
En Brasil, la primera estación terrena de comunicaciones, fue la de Tanguá (RJ), construida en 1968 por la EmBraTel e inaugurada en 1969, lo que permitió recibir en vivo la llegada del ser humano a la Luna y, al año siguiente, el campeonato mundial de fútbol de México.

Las comunicaciones vía satélite, tienen una capacidad limitada en cantidad de comunicaciones de voz simultánea o en cantidad de gigabytes de datos transmitidos. En cuanto a la comunicación de voz, tienen además otro inconveniente: Las ondas (que se desplazan a la velocidad de la luz), demoran alrededor de un cuarto de segundo en completar un salto; es decir que lo que se escucha del interlocutor de una comunicación telefónica, tiene ese retardo. Esto complica las comunicaciones telefónicas y, en el caso de comunicaciones de "doble salto", como por ejemplo, entre Brasil y Japón, las vuelve muy difícil de sostener en la práctica.

Por los motivos anteriores, cuando se pudo desplegar una red mundial de fibras óptica a través de enlaces terrestres y cables submarinos, las comunicaciones vía satélite fueron abandonadas. Esto no significó que, los satélites artificiales de comunicaciones dejaran de utilizarse, sino que, cambiaron el tipo de comunicación para los que son utilizados. En particular, los antiguos satélites de comunicaciones, fueron sustituidos mayormente por satélites para distribución de TV y, en algunos casos, también para acceso a la red Internet.

1.2 - Órbitas y sus características

Actualmente (2021), orbitan la Tierra, unos 4.300 satélites artificiales de todo tipo. Muchos de ellos están destinados a las comunicaciones y, por lo tanto, contribuyen a la contaminación electromagnética en el planeta. Para avanzar sobre el tema de la contaminación causada por los satélites artificiales, conviene primero, tener un panorama general del despliegue actual satelital. Para ello, se verá la figura 2.



El gráfico representa a la Tierra y, a su alrededor, diferentes órbitas circulares⁷ de satélites artificiales. Hay cuatro ejes graduados (hacia la izquierda, derecha, arriba y abajo) que, representan distintas cosas.

El eje hacia la izquierda, radio de la órbita, representa la distancia desde el centro de la Tierra medida en kilómetros. El eje hacia la derecha, en cambio, representa la altura sobre la superficie de la Tierra o sobre el "nivel del mar"; es decir que sus valores son los del eje de la izquierda, a los que se les ha descontado el radio de la Tierra que, es de aproximadamente de 6.378 kilómetros.

El eje hacia abajo, velocidad orbital, está graduado en la velocidad en kilómetros por hora a la que se desplazará un satélite artificial que esté en órbita a la altura que se puede medir en el eje de la derecha. Por ejemplo, un satélite en una órbita a 36.000 kilómetros

⁷ Las órbitas circulares, o casi circulares, de los satélites, son las comúnmente utilizadas. También se utilizan satélites artificiales con órbitas marcadamente elípticas, utilizados por ejemplo, para cubrir las regiones polares.

de altura sobre la Tierra, girará a aproximadamente 11.000 kilómetros por hora. Se observará que, cuando mas baja es la órbita del satélite, éste se desplazará a mayor velocidad⁸.

Se observa también en el gráfico, los llamados "cinturones de Van Allen". Éstos, son dos zonas de la magnetosfera terrestre donde se concentran grandes cantidades de partículas cargadas de alta energía, originadas en su mayor parte por la radiación solar capturada por el campo magnético terrestre. Estos cinturones altamente radiactivos, están diferenciados en: un cinturón "interior" constituido principalmente por protones de alta energía y, un cinturón "exterior": Formado principalmente por electrones de alta energía. Las alturas de ambos cinturones son variables, pero, se podría ubicar el cinturón interior entre los 2000 y los 5000 kilómetros y, al exterior, entre los 15000 y, alrededor de los 60000 kilómetros.

El eje hacia arriba de la figura 2, está graduado en el tiempo que tarda un satélite al dar un giro completo a la Tierra; el llamado periodo orbital. En cuanto a esto, hay una órbita muy particular, que corresponde a una altura del satélite de, aproximadamente 36.000 kilómetros, para la cual el periodo orbital es de 24 horas.

Si se coloca en órbita un satélite artificial, a 36.000 kilómetros de altura sobre la línea del ecuador terrestre y, su desplazamiento es de oeste a este, el satélite "acompañará" la rotación de la Tierra y, entonces aparecerá como inmóvil para un observador terrestre. Esta órbita particular, es llamada "geo estacionaria" y, a veces "geo síncrona" o, directamente, órbita GEO, por su sigla en inglés: Geosynchronous Equatorial (ó Earth) Orbit.

Los primeros satélites artificiales de comunicaciones, para las "comunicaciones vía satélite", se ubicaban en esa órbita y, hoy lo hacen muchos satélites de distribución de televisión, algunos satélites meteorológicos y otros. La órbita GEO está sumamente "congestionada", dado que todos los satélites tienen que estar sobre el ecuador y todos a 36.000 kilómetros de altura. Por lo tanto, hay una asignación precisa de los "lugares" en donde se pueden ubicar satélites, realizado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT ó ITU), organización que depende de las Naciones Unidas. En la Figura 3, se grafica un ejemplo de esa asignación.

⁸ Un satélite en órbita se rige por leyes similares a las que determinan a una piedra, a la que hacemos girar, atada en el extremo de una cuerda; la piedra intenta desplazarse en línea recta pero, la cuerda (en este caso la fuerza de gravedad de la Tierra), la obliga a desplazarse en una trayectoria curva. Cuanto mas corta es la cuerda, más rápido girará la piedra para mantener su movimiento circular; en el caso de los satélites artificiales, cuanto más cerca de la Tierra se encuentre, deberá girar a mayor velocidad, para mantenerse en órbita.

Matemáticamente, se puede plantear la siguiente "ecuación del satélite": $r = \sqrt[3]{\frac{g \cdot m_T}{\omega^2}} - R_T$

con: r: Altura del satélite sobre el nivel del mar, en m
ω: Velocidad angular del satélite, en radianes por seg
(un giro completo a la tierra, son 6,28 radianes)
g: Aceleración de la gravedad = $6,67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2\text{Kg}^{-2}$
m_T: Masa de la Tierra = $5,9736 \times 10^{24} \text{Kg}$
R_T: Radio de la Tierra = $6,378 \times 10^6 \text{m}$

y, entonces: v: Velocidad orbital = $\omega (r + R_T) = [\text{m/s}]$

(fórmula adaptada de las ecuaciones en

<http://www2.elo.utfsm.cl/~elo352/2010/Exp4/DocumentacionRS2008/Ecuaciones%20de%20orbita.pdf>)

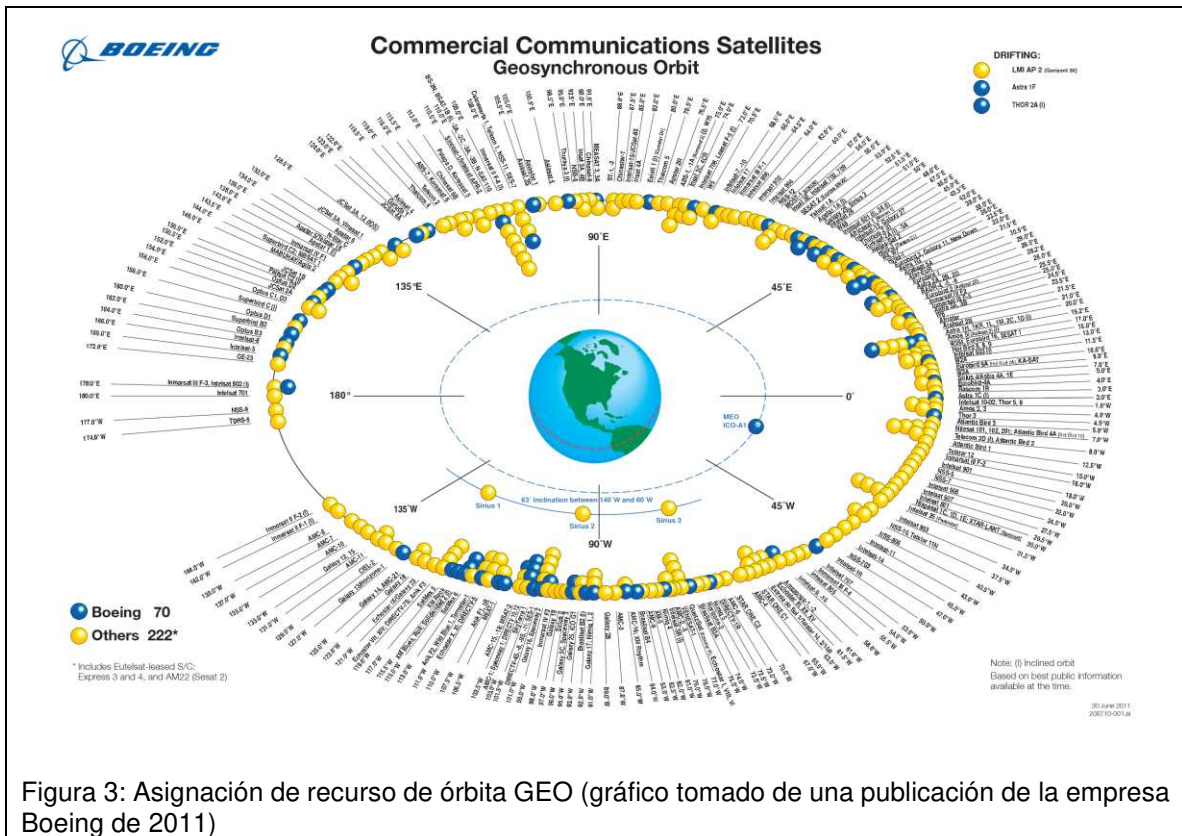


Figura 3: Asignación de recurso de órbita GEO (gráfico tomado de una publicación de la empresa Boeing de 2011)

Como se observa del gráfico, los satélites están distanciados, uno o dos grados en sus posiciones, teniendo los países y algunas corporaciones, "reserva" de posiciones satelitales.

Los satélites de órbita media (ó MEO - Medium Earth Orbit), de alrededor de 20.000 Km de altura, son en su mayoría los satélites de posicionamiento: GPS (USA), Galileo (Europa), Glonass (Rusia), BeiDou (China). La elección de esa órbita, se basa mayormente en que, los satélites orbitan de manera de pasar alrededor de dos veces en un día, sobre un punto de la superficie terrestre.

Pero, la órbita de mayor interés al considerar la polución electromagnética generada por los satélites artificiales, es la "órbita baja", o LEO (Low Earth Orbit), donde los satélites se ubican por debajo del cinturón inferior de Van Allen y, por encima de la ionósfera⁹. Los satélites LEO, se desplazan continuamente con respecto a un observador terrestre y, debido a su baja altura, suelen ser visibles en horarios nocturnos bajo ciertas circunstancias, cuando su ubicación permite reflejar la luz solar. Esta órbita está ocupada por satélites que tienen diferentes funciones y que, se representan en forma simplificada en la figura 4.

⁹ La ionósfera es la parte de la atmósfera terrestre ionizada permanentemente debido a la fotoionización que provoca la radiación solar. Es, como se dijo, la responsable de la reflexión de ondas de radio (de "onda corta"), desde y hacia la superficie terrestre. Se extiende desde aproximadamente los 60, hasta los 400 kilómetros sobre la superficie terrestre.

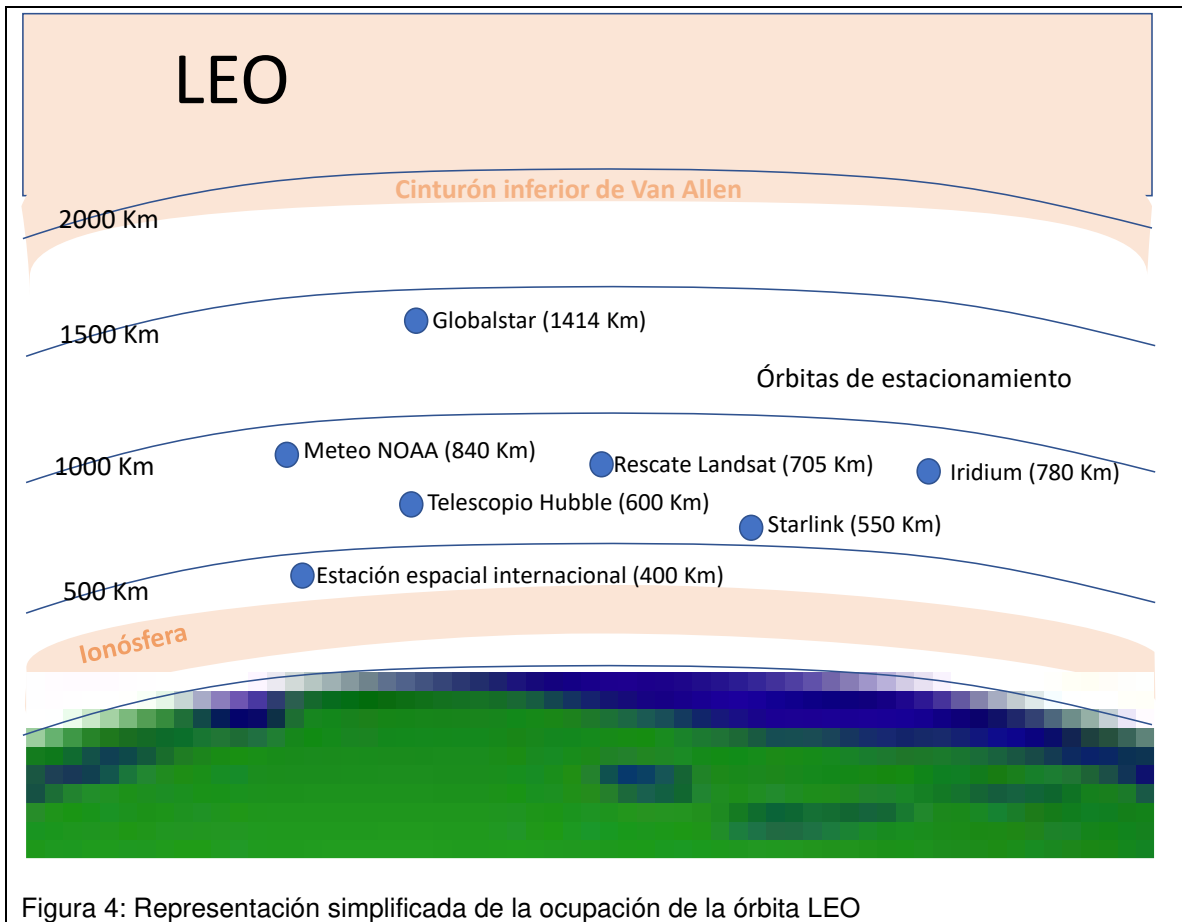


Figura 4: Representación simplificada de la ocupación de la órbita LEO

Como se aprecia, esta es la zona orbital de la estación espacial internacional (ISS), del telescopio Hubble, de satélites meteorológicos, de rescate y de comunicaciones bidireccionales. También están en esta zona, las llamadas "órbitas de estacionamiento" (de "aparcamiento", parking orbits), que son órbitas temporarias para que naves espaciales o satélites, se posicionen de la mejor manera, para iniciar una trayectoria hacia otra órbita o hacia el espacio exterior.

1.3 - Los satélites de órbita baja (LEO)

Como se dijo, en cuanto a las comunicaciones, los satélites GEO se dedican principalmente a difusión¹⁰ (de TV, por ejemplo) mientras que, los satélites capaces de comunicaciones bidireccionales, como las redes Iridium o Globalstar y, más recientemente, los Starlink, se ubican en la zona de las órbitas LEO.

Las ventajas de las órbitas LEO, son la menor atenuación de las ondas y el menor retardo en la propagación de éstas. Esto es consecuencia de las menores distancias entre transmisores y receptores, que proporcionan las órbitas bajas.

La desventaja es que, mientras son necesarios solo tres satélites GEO para cubrir toda la superficie terrestre¹¹, se necesitan decenas o cientos de satélites, en órbitas LEO. Se habla entonces, de "constelaciones" de satélites. Por ejemplo, la constelación Iridium, cuenta con sesenta y seis satélites. En la figura 5, se presentan algunas comparaciones entre las órbitas GEO y LEO.

¹⁰ Hay también comunicaciones bidireccionales en satélites GEO, sobre todo para "Internet satelital"

¹¹ A excepción de las áreas polares

	GEO	LEO	
Altura sobre la Tierra	36.000 Km	500 Km	
Tiempo que tarda una señal (subida y bajada)	250 mseg	3,5 mseg	72 veces menos
Atenuación de las señales (*)			
Banda C (ej. 5 GHz)	187,5 dB	150,4 dB	5.187 veces menos
Banda Ka (Ej. 25 GHz)	201,5 dB	164,4 dB	
Número de satélites para cobertura	3	decenas / cientos / miles	

Fig. 5: Algunas comparaciones GEO ↔ LEO (* la atenuación de las señales está expresada en decibeles; diez veces el logaritmo del cociente entre las potencias transmitidas y recibidas)

En cuanto a la necesidad de constelaciones de satélites para cubrir la superficie terrestre con órbitas LEO, la figura 6, muestra esto en forma gráfica:

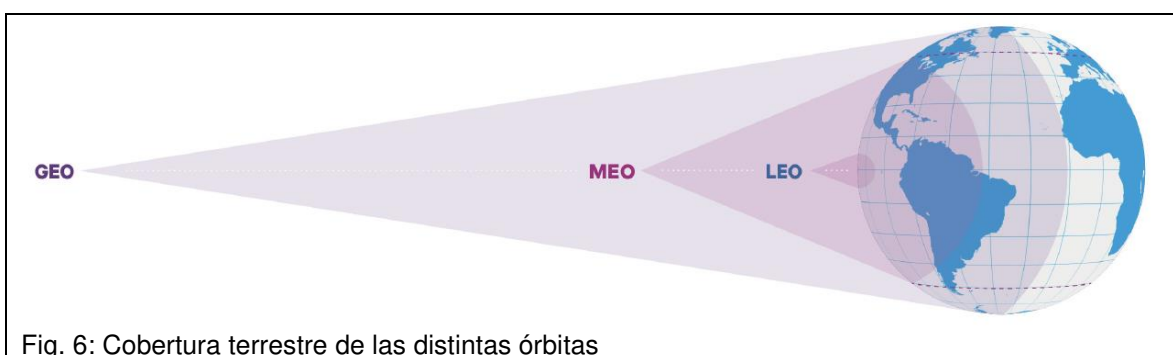


Fig. 6: Cobertura terrestre de las distintas órbitas

Si las constelaciones clásicas de satélites artificiales en órbita baja (Iridium, Globalstar), utilizan decenas de satélites; el panorama en las órbitas LEO, está comenzando a cambiar drásticamente con el advenimiento de las llamadas "mega constelaciones". Esto tiene su inicio con el proyecto (ahora, empresa) Starlink, de Space X, por el que se planea colocar 12.000 satélites en órbita en una primera etapa, para llegar luego a 30.000 o más. En 2019 se lanzaron los primeros 60 satélites Starlink. Hoy (diciembre de 2021), hay alrededor de 1.900 en órbita¹².

Pero Starlink no parece ser la única mega constelación que tendremos en el cielo; otras empresas en los Estados Unidos, así como en China y otros países, están previendo lanzar sus propias mega constelaciones. Decenas (quizás cientos) de miles de satélites artificiales, representarán sin duda un cambio cualitativo, no solo en la situación satelital, sino también en la propia cuestión del espacio exterior.

No hay un límite claro entre la atmósfera terrestre y el espacio exterior. No obstante, la Federación Aeronáutica Internacional ha establecido una altitud de 100 kilómetros como una definición de trabajo para el límite entre la atmósfera y el espacio. Estados Unidos, por otro lado, designa a la gente que viaja por encima de una altitud de 80 km como astronautas¹³. En general, se acepta que la soberanía de los países, el llamado "espacio aéreo" propio, se extiende hasta los 100 kilómetros de altura.

Entonces, las mega constelaciones LEO, se encuentran técnicamente en el espacio exterior, en una región que no está bajo ninguna jurisdicción nacional y, en donde tampoco hay acuerdos internacionales, como en la órbita GEO, por ejemplo, y que, dado

¹² Ver <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>

¹³ Ver https://en.wikipedia.org/wiki/Outer_space , en Boundary

las condiciones legales y técnicas de algunas empresas, hoy está siendo apropiado por actores privados, además de por los gobiernos nacionales.

Se comprenderá que el cambio de panorama es cualitativo, si se piensa que hoy, el número total de satélites artificiales de todo tipo, no alcanza los 5.000 y que, para poner una referencia, el número total de estrellas visibles que, es posible observar en una noche clara, es de alrededor de 9.000.

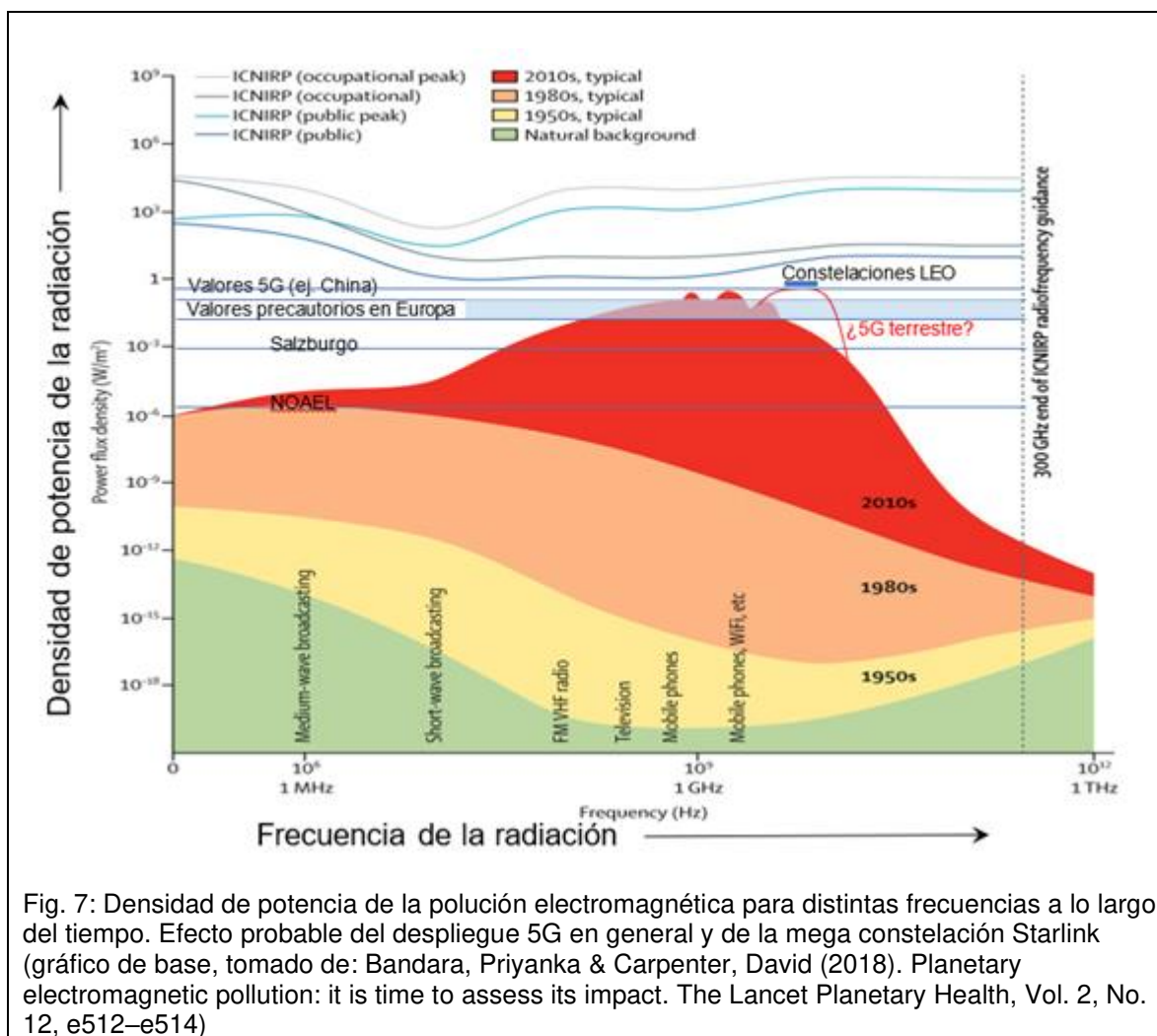
Decenas de miles de satélites artificiales, reflejando muchos de ellos la luz solar mientras orbitan, puede llegar a cambiar la imagen del cielo nocturno. De hecho, las primeras quejas a la mega constelación Starlink, se alzaron de las asociaciones de astrónomos, lo que obligó a la empresa a cambiar en parte el diseño de los satélites, utilizar pintura anti reflectiva, etc¹⁴.

¹⁴ Esto ya ocurrió con los primeros lanzamientos. Ver <https://super.abril.com.br/ciencia/o-plano-da-starlink-para-tornar-seus-satelites-menos-brilhantes/>

Segunda parte: La contaminación satelital

2.1 - La contaminación electromagnética actual

Las mega constelaciones de satélites artificiales, al irradiar continuamente hacia la Tierra, van a aumentar los niveles de densidad de potencia electromagnética sobre la superficie terrestre, es decir, van a contribuir al aumento de la contaminación electromagnética. Para ver lo que significa esto, conviene prestar atención a la figura 7.



En el gráfico de base adoptado¹⁵, se indican con diferentes colores, los valores de densidad de potencia electromagnética para distintas frecuencias, que se han observado al pasar las décadas¹⁶, comenzando desde la zona de color verde, que representa la radiación natural. También están indicados los límites establecidos por la ICNIRP¹⁷. Estos

¹⁵ Bandara, Priyanka et al.(2018)

¹⁶ Valores típicos para ambientes urbanos o suburbanos, en países desarrollados.

¹⁷ ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Comisión Internacional de Protección de Radiación no Ionizante); es una entidad privada, cuyas recomendaciones suelen ser tomadas como referencia por, por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud (OMS - WHO). En el gráfico de base, están representados los lineamientos de 1998 (<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>); estos lineamientos, fueron luego, levemente modificados en 2020.

límites, son valores destinados a la protección sobre los efectos térmicos de la radiación electromagnética, entre 0 Hz hasta la frecuencia de 300 GHz.

Sobre el gráfico de base, se han agregado:

- La representación de los valores más restrictivos adoptados en algunos países y ciudades de Europa (entre 0,01 y 0,1 W/m²; vatios por metro cuadrado - es decir, entre 1 y 10 μW/cm²; micro vatios por centímetro cuadrado -), dado la aplicación del Principio Precautorio en esos países y ciudades, para proteger a la población del posible daño a la salud en el largo plazo, en consideración de los efectos biológicos o no - térmicos de la radiación electromagnética.

- El valor de densidad de potencia precautorio recomendado por la conferencia de Salzburgo de 2000¹⁸ (0,001 W/m²; ó 0,1 μW/cm²).

- El valor de NOAEL (nivel - más alto - en que no hay efectos biológicos adversos observados - no observed adverse effect level -, según Neil Cherry¹⁹. Igual a 0,000 003 W/m²; ó 0,0003 μW/cm²).

También se indica sobre el gráfico de base, el posible crecimiento que producirá el despliegue de la quinta generación de redes móviles (5G). Esta suposición toma en cuenta dos cosas:

- En cuanto a la banda de frecuencia afectada; la que utilizará la 5G terrestre, que incluye ondas milimétricas.

- En cuanto al efecto de 5G sobre la densidad de potencia; se toma en consideración que, en los países y ciudades donde se tienen regulaciones más restrictivas (indicadas sobre el gráfico como "valores precautorios en Europa"; entre 0,01 y 0,1 W/m²), se ha visto que, resulta muy, o extremadamente difícil, el despliegue de las redes 5G por no ser compatibles con estas regulaciones²⁰. Los intentos de cambiar estas regulaciones, apuntan a llevarlas al rango de los 0,4 W/m² ó 40 μW/cm². Esto coincide con los límites fijados por algunos países, en particular China, pensando en el despliegue de 5G. Por eso, se estima que, el aumento de radiación en las bandas de 5G, alcanzará estos valores.

Las bandas de frecuencias para la transmisión y recepción de las mega constelaciones de satélites de órbita baja, están en general, entre los 10 GHz y los 30 GHz, es decir que se superponen parcialmente con las bandas de la 5G terrestre. Si se toma por verdadero el incremento debido a la 5G terrestre, supuesto en el párrafo anterior, queda por evaluar en que forma la radiación satelital, aumenta la radiación terrestre.

2.2 - La radiación de los satélites de órbita baja

¹⁸ International Conference on Cell Tower Siting - Linking Science & Public Health. Salzburg, Austria, June 7 – 8, 2000 - Federal State of Salzburg, Public Health Department, Environmental Health & University of Vienna, Institute of Environmental Health

¹⁹ Neil Cherry (1999), (2001) Evidence that Electromagnetic Radiation is Genotoxic: The implications for the epidemiology of cancer and cardiac, neurological and reproductive effects

²⁰ Ver por ejemplo: https://eufordigital.eu/steeringcommittee2/images/resources/EU4D_-_Afternoon_side_talk_How_to_accelerate_5G_launch_in_EaP_region.pdf

Los satélites de órbita baja, tienen una cobertura (satellite footprint) de entre 2800 y 75000 Km² (dependiendo de la altura de la órbita - entre 300 y 1200 Km, respectivamente -)²¹. Cada satélite divide su cobertura en celdas, utilizando haces (beams) angostos (de 2° a 5°), de manera de limitar el número de usuarios por celda, para poder manejar su tráfico de comunicación. Por ejemplo, en el caso de Starlink, se utilizan en general, ocho haces (también dieciséis), cubriendo cada uno de estos haces, unos 380 Km².

Lo anterior, es para hacer notar que, para evaluar la polución de una constelación, es razonable considerar que, sobre un punto dado de la superficie terrestre, el efecto de la radiación, corresponde al producido por un solo satélite de esa constelación, mediante uno de sus haces.

Para evaluar la polución electromagnética producida por un satélite, hay que calcular la densidad de potencia de radiación (S_r) que éste produce sobre la superficie terrestre²². Ésta puede calcularse mediante la fórmula:

$$S_r = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2}$$

donde P_T y G_T , son la potencia emitida por el satélite expresada en vatios y la ganancia de la antena del mismo expresada en "veces" (este producto, da la PIRE: Potencia Isótropa Radiada Equivalente, es decir, cuanto debería irradiar el satélite, simultáneamente en todas las direcciones del espacio, para producir el mismo efecto que produce con su haz sobre la superficie terrestre). R por su parte, es la distancia en metros del satélite al receptor (de manera que $4\pi R^2$, es la superficie de una esfera con radio R). Entonces, la potencia (equivalente) irradiada en todas las direcciones del espacio,

²¹ Shiyi Xia et al (2019). Beam Coverage Comparison of LEO Satellite Systems Based on User Diversification (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8933127>). Están tomadas como ejemplo, las constelaciones Starlink y OneWeb.

²² Esto presenta diferencias con el cálculo de enlace (link budget) de una transmisión de un satélite hacia tierra. El satélite emite la radiación con una cierta potencia y, trata de enviarla en su totalidad, al receptor en la Tierra. Para hacer esto, tendría que concentrar a esta radiación, mediante su antena, en un haz que fuera solo una línea directa satélite - receptor. Como los haces, si bien son angostos, no pueden concentrar toda su potencia sobre el receptor, solo llegará a éste, una parte de la potencia emitida, la que será captada por la antena del receptor. Cuanto más diámetro tenga la antena del receptor, mayor cantidad de esa potencia captará.

Para hacer los cálculos de la potencia que capta el receptor, se recurre a unos parámetros técnicos auxiliares:

- La ganancia de la antena del satélite (G_T) que, es una medida de cuan estrecho es el haz en que el satélite concentra su potencia.
- La "atenuación del espacio libre" (free space loss - L_s) que, representa cuanto se dispersaría la potencia si el satélite emitiera por igual en todas direcciones. La atenuación del espacio libre depende de la distancia entre el satélite y el receptor y de la frecuencia utilizada en la transmisión.
- La ganancia de la antena del receptor (G_R) que, evalúa cuanto de la potencia dispersa por el haz, captará el receptor

La potencia del satélite (P_T), en general se la mide en decibeles por encima de un vatio (dBw) o, por encima de un milivatio (dBm). Con esto y, al expresar ganancias y atenuaciones en decibeles, el cálculo de la potencia de recepción (P_R), se resume en sumas y restas:

$$P_R = P_T + G_T - L_s + G_R$$

(Y se suele nombrar a $P_T + G_T =$ PIRE - Potencia Isótropa Radiada Equivalente, ó EIRP - Effective Isotropic Radiated Power; -. Esta fórmula está simplificada; en la práctica se incluyen otros parámetros como ser: la atenuación de los cables y acopladores, atenuaciones adicionales en la atmósfera y la ionósfera - absorción de gases, depolarización ionosférica -, atenuación por mal alineamiento de antenas, etc.; ver https://www.just.edu.jo/~hazem-ot/Session%208_%20link%20budget.pdf).

dividida por la superficie donde esta se desarrolla, expresa la densidad de potencia de radiación S_r ²³.

Las PIRE típicas para los satélites de algunas constelaciones conocidas son²⁴:

Starlink	36,71 dBw	(R \cong 300 Km)
OneWeb	36,6 dBw	(R \cong 1200 Km)

Convirtiendo los dBw a vatios y, haciendo el cálculo, resulta:

Starlink	S = 0,000 000 004 26 W/m ²	(S = 0,000 000 426 μ W/cm ²)
OneWeb	S = 0,000 000 000 16 W/m ²	(S = 0,000 000 16 μ W/cm ²)

La PIRE máxima permitida por la FCC²⁵ de Estados Unidos para los satélites, es de 66,89 dBw²⁶, es decir, sensiblemente superior a los valores típicos recién considerados. Si se calcula la densidad de potencia de radiación que se tendría con ese PIRE y con satélites a 300 Km de altura, se llega a un valor de S = 0,000 004 45 W/m² (S = 0,000 445 μ W/cm²), es decir, por encima del valor de NOAEL, el nivel más alto en que no hay efectos biológicos adversos observados.

No sabemos cuantas constelaciones de satélites de órbita baja operarán en el futuro. Además de las ya operativas Starlink, la inglesa OneWeb y la canadiense Telesat²⁷, China ya comenzó a desplegar su megaconstelación Gou Wang, Europa quiere su propia megaconstelación y, lo mismo la India y la rusa Roscosmos. También empresas como Amazon están implementando la suya (Kuiper) y, lo mismo hacen Samsung y Boeing²⁸. El Pentágono ha anunciado que tendrá también su constelación propia.

No es descabellado entonces, plantear un escenario futuro con cada punto de la Tierra, irradiado por al menos, diez constelaciones en forma simultánea. En esta situación, la densidad de potencia de radiación en un punto, resulta simplemente la suma de las densidades de potencia debidas a cada constelación. Con diez constelaciones similares a la actual Starlink, la densidad de potencia de radiación que tendríamos en (casi) todos los lugares del planeta, sería del orden de

$$S = 0,000 000 04 \text{ W/m}^2 \quad (S = 0,000 004 \text{ } \mu\text{W/cm}^2)$$

Estos valores muestran que, el efecto de la radiación satelital sobre la polución electromagnética generada por las redes terrestres, representada en la Figura 7, no es relevante. Pero, por un lado, hay que hacer notar que, si la potencia de los satélites aumenta en un futuro, tendiendo a alcanzar la PIRE máxima, sería probable que la radiación superase el valor para el que se observan efectos biológicos.

Por otro lado y, más importante aún, el gráfico de la Figura 7 corresponde a valores típicos para ambientes urbanos o suburbanos, en países desarrollados. La radiación satelital, en cambio, se desarrollaría sobre todo el planeta. Esto significaría que, la polución electromagnética, se extendería a todos los confines de la superficie terrestre. No quedaría sitio en la Tierra, libre de esta contaminación. No habría lugar natural donde

²³ Nótese que, este cálculo es independiente de la frecuencia utilizada en la transmisión.

²⁴ Shiyi Xia et al (2019)

²⁵ Comisión Federal de Comunicaciones

²⁶ <https://www.linkedin.com/pulse/quick-analysis-starlink-link-budget-potential-emf-david-witkowski/>

²⁷ <https://www.telesat.com/leo-satellites/>

²⁸ <https://danielmarin.naukas.com/2021/06/05/la-megaconstelacion-china-de-trece-mil-satelites/>

refugiarse, si uno es electro sensible o, simplemente, no quiere estar expuesto a la radiación electromagnética generada por el ser humano.

2.3 - Los efectos globales y el negocio

Pero el efecto de las mega constelaciones de satélites de comunicaciones en órbita baja, no se restringe solo a la polución electromagnética. Se puede avizorar resumidamente:

- Problemas con la basura espacial (la vida útil de los satélites es de cinco años). Si bien están previstos, métodos para descartar los satélites, los riesgos de caída siempre están. Además, las órbitas actuales, ya contienen gran cantidad de basura espacial.

- Problemas con las colisiones entre satélites (ya se han reportado maniobras evasivas). Apenas lanzados, los Starlink estuvieron a punto de chocar con un satélite meteorológico europeo²⁹ y, más recientemente con la estación espacial china³⁰.

- Problemas con la polución lumínica

- Para la astronomía (en las fotografías astronómicas y en general)³¹. Tal vez, el cielo nocturno como lo conocemos, con esa negrura honda y la vía láctea y las estrellas resplandeciendo, será un paisaje que, ya nunca más volveremos a ver.
- Para animales y plantas (orientación, ciclos de las flores). No se conoce el efecto que puede tener en animales migratorios que dependen de las estrellas para su orientación, como los insectos y aves³², así como, los ciclos de las flores que dependen de las variaciones noche - día.
- Para los seres humanos (producción de melatonina). Se sabe que el "ritmo circadiano, la sucesión natural de luz y oscuridad, regula la actividad de la glándula pineal y la consiguiente producción de melatonina, que asegura el sueño y la vida saludable. Esto, resultará alterado con las mega constelaciones satelitales.

Además, lo ya nombrado con respecto a la propia polución electromagnética que, no se restringe solo a los seres vivos, sino que, también se traduce en interferencias y cuestiones generales de compatibilidad electromagnética entre sistemas y equipos.

- Problemas con la polución electromagnética

- Para los sistemas de comunicaciones (ej. interferencias sobre la TV que se distribuye desde los satélites geoestacionarios)
- Para los seres vivos (aumento y globalización de la contaminación electromagnética). Como ya fue descrito.

Cabría preguntarse entonces; ¿qué beneficios nos traerán estas mega constelaciones de satélites perjudiciales y contaminantes? La respuesta que nos dan las empresas, en particular Starlink, es que, tendremos la posibilidad de acceder a internet en todo el mundo, independientemente del lugar donde uno se encuentre, por más remoto que sea éste.

²⁹ https://www.economiadigital.es/tecnologia/maniobra-en-el-espacio-para-no-chocar-con-un-satelite-de-elon-musk_647384_102.html

³⁰ <https://www.dw.com/es/china-denuncia-que-los-sat%C3%A9lites-starlink-de-elon-musk-casi-chocan-con-su-estaci%C3%B3n-espacial/a-60281898>

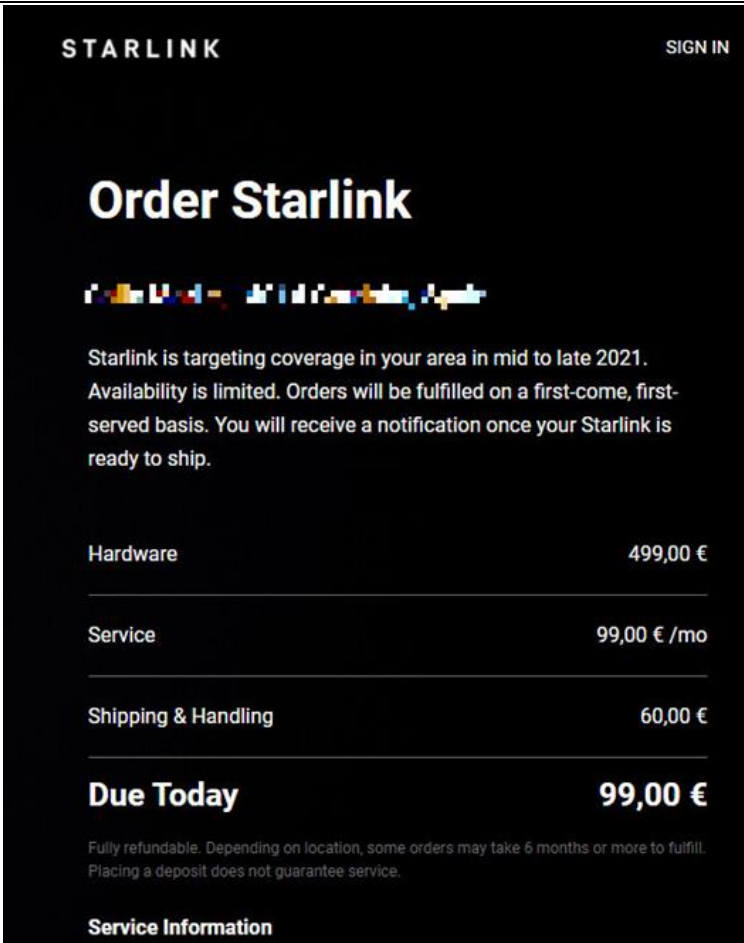
³¹ <https://elpais.com/ciencia/2020-08-31/no-podras-mirar-las-estrellas-sin-ver-un-satelite.html>

³² <https://www.elagoradiario.com/ciencia-e-innovacion/starlink-avance-tecnologico-problema-ambiental/>

Pero esta aseveración, podría ser cierta, solo como una consecuencia marginal del proyecto. La intención de las mega constelaciones de satélites de órbita baja, no es esa.

El objetivo de Starlink, así como de las futuras mega constelaciones, es ir por la mayor cantidad de clientes, independientemente de su ubicación geográfica y, en los términos de empresas privadas capitalistas. La "venta" del acceso Starlink, no está dirigida a usuarios remotos, ni que se encuentren en ubicaciones inaccesibles por otros medios. El acceso Starlink, estará disponible para quien lo pueda pagar. Starlink y los futuros accesos a las mega constelaciones, no son otra cosa que gigantescos planes de negocios, con inversiones, riesgos, tasa de retorno, periodo de repago, etc.

Observemos la figura 8. Son las condiciones para un pedido de servicio en Europa, donde se ve que hay que pagar el equipo (499 euros), el envío (60 euros) y la primera cuota mensual por el servicio (99 euros). No hay referencias a ubicación remota o inaccesible. El servicio se promociona en competencia con cualquier otro tipo de acceso a internet que estuviera disponible en el lugar del usuario. El servicio estará disponible, no sobre la base de la ubicación remota del usuario, sino para el usuario que esté dispuesto a pagar 99 euros mensuales por el servicio.



Item	Price
Hardware	499,00 €
Service	99,00 € /mo
Shipping & Handling	60,00 €
Due Today	99,00 €

Fully refundable. Depending on location, some orders may take 6 months or more to fulfill. Placing a deposit does not guarantee service.

Service Information

Figura 8: Condiciones de pedido de servicio, de un ejemplo en Europa

2.4 - Conclusiones

Los satélites artificiales, han producido en los últimos sesenta años, grandes beneficios para las comunicaciones y otras cuestiones como la meteorología, el posicionamiento y la observación de la superficie de la Tierra en general. En esto, la contribución de los

mismos a la polución electromagnética, no ha sido relevante hasta hace muy poco tiempo. Sin embargo, la planificación a mediados de la década anterior y, el lanzamiento efectivo de constelaciones de satélites de órbita baja que, ha comenzado masivamente por parte de la empresa Starlink en el año 2021 y, promete incrementarse grandemente en el futuro próximo con el lanzamiento de nuevas constelaciones, están modificando esta situación.

En efecto, la puesta en órbita de decenas de miles de satélites, lo que significa, multiplicar por diez o por veinte, la cantidad de satélites actuales, no solo promete causar múltiples problemas en cuanto a basura espacial, peligro de colisiones entre satélites, polución lumínica, con sus perjuicios para las plantas, los animales y seres humanos y, para la astronomía, sino que, convierte a los satélites artificiales de comunicaciones, en una causa principal del aumento de la polución electromagnética.

Este aumento, no parece que tendrá una gran importancia cuantitativa en los lugares afectados por la polución proveniente de los sistemas electromagnéticos terrestres, como son las zonas densamente pobladas. Sin embargo, en zonas suburbanas, rurales o, aún despobladas, las constelaciones de satélites de órbita baja, agregarán polución donde hasta ahora, es inexistente. Por un lado, es posible que no se pueda encontrar una región sobre la Tierra, libre de la polución electromagnética. Por otro lado, la polución debida a esta radiación satelital, constituirá un "piso", un "fondo" para la polución electromagnética, en toda la superficie terrestre.

El argumento de venta para que nos conectemos a estos satélites, principalmente, para tener acceso a internet, es su ubicuidad, la posibilidad de acceder a la red, independientemente de cualquier medio terrestre y, sin importar el lugar del planeta en que nos encontremos. Se los promociona como los grandes favorecedores de la conectividad en zonas remotas, como un ejemplo de como el progreso y la técnica, ayudan a las necesidades de los seres humanos.

En realidad, las necesidades de los seres humanos, en particular, la necesidad de servicios esenciales, debería encararse con una visión social global y, con la participación activa de los estados nacionales. Existen en el mundo, centenares o miles de millones de personas sin acceso a servicios básicos, como agua potable, saneamiento, y energía limpia. Resulta paradójico que, empresas privadas, cuyo objetivo "natural" es maximizar beneficios, tomen un discurso que parecería estar dirigido a solucionar necesidades sociales.

Es un discurso, además, orientado a una pretendida libertad, concebida esta como autonomía, en lugar del verdadero sentido de la libertad como armonización con la naturaleza y la sociedad. Está claro que ser libre, de esa manera equivalente a ser autónomo, solo es posible si se tiene poder. Con esa concepción de la libertad como autonomía, se es más libre cuando más poder se tiene. En este caso, el poder es poder económico. La "libertad" de acceder a internet en cualquier lugar geográfico, mediante Starlink u otra constelación de satélites de órbita baja, será para el que tenga dinero para pagar la conexión.

Las constelaciones de satélites de órbita baja, no son sistemas orientados a usuarios remotos. En cambio, son sistemas pensados para competir con todos los sistemas terrestres, para aprovechar sus ventajas competitivas en cualquier terreno. Haciendo esto, introducen un escalón más en la polución electromagnética que afecta al planeta. Adicionalmente, harán que el cielo profundamente negro, tachonado de estrellas, contemplado desde una montaña, un desierto o el mar, será un espectáculo que las generaciones venideras, ya nunca más podrán contemplar, si no somos capaces de revertir estos descabellados proyectos.