



Una antena parabólica en el techo de un estudio de televisión. Foto [sxc.hu/dlritter](https://www.sxc.hu/dlritter)

Tomás Gergely

National Science Foundation, Estados Unidos

La gestión del espectro de radio

Un reciente aviso publicado en un diario de los Estados Unidos invitaba a un debate sobre oferta y demanda del espectro radial. Proclamaba en letras enormes: *Desde el teléfono que tiene en sus manos hasta los satélites que están en el espacio, casi todo usa el espectro.* No es una exageración. Los usos del espectro de radio se han multiplicado hasta el punto que su simple enumeración excedería por mucho la longitud de este artículo.

El espectro de radio es una parte del espectro electromagnético, que es el conjunto de toda la radiación electromagnética. La nomenclatura y la delimitación de las partes del espectro son arbitrarias. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), en el Reglamento de Radiocomunicaciones, define el espectro de radio como *ondas electromagnéticas cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de 3000GHz, que se propagan en el espacio sin guía artificial.*

A diferencia de la luz visible, cuyas ondas se describen habitualmente por su longitud, las ondas de radio se suelen caracterizar por su frecuencia, que es inversamente proporcional a dicha longitud y se expresa en hertzios (Hz) o vibraciones por segundo. La banda FM de la ra-

dio, conocida por todos, ocupa aproximadamente 20MHz (millones de vibraciones por segundo) del espectro, ubicadas entre los 88 y 108MHz. Si en nuestra imaginación prolongamos la escala del dial de una radio FM hacia ambos lados, deberíamos extenderlo por cuatro órdenes de magnitud (diez mil veces) por debajo de los 88MHz y por otros cuatro por encima de 108MHz, para abarcar lo que convencionalmente se entiende como el espectro de radio. Es un rango enorme, mucho mayor que el de la parte visible del espectro, que está comprendida aproximadamente entre los 4000 y los 8000 angstroms ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) en longitud de onda, una extensión considerablemente menor que un orden de magnitud (diez veces).

Las distintas partes del espectro tienen diferentes propiedades de propagación y esto, junto con algunas otras características, determina su uso. La parte más codiciada (y por ende más costosa) del espectro es la región comprendida aproximadamente entre 30MHz y 3GHz. En ese rango de frecuencias, las ondas de radio atraviesan la atmósfera terrestre prácticamente sin atenuación, por lo cual muchos sistemas satelitales, como el GPS, transmiten en bandas comprendidas en dicho intervalo.

¿DE QUÉ SE TRATA?

Qué es el espectro de radio y cómo se procura evitar que no se interfieran entre ellas las millones de comunicaciones que lo usan simultáneamente en todo momento y en todo el mundo.

Un poco de historia

Algunos fenómenos eléctricos y magnéticos eran conocidos en la antigüedad, pero su estudio sistemático comenzó en el siglo XVII. La teoría del electromagnetismo quedó definitivamente establecida en la década de 1860 con las ecuaciones del físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) y su obra *Teoría dinámica del campo electromagnético* (1865). Esas ecuaciones predijeron la existencia de ondas electromagnéticas, lo que fue confirmado hacia fines de la década de 1880 por los experimentos del físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894), quien no alcanzó a darse cuenta de la importancia práctica del descubrimiento.

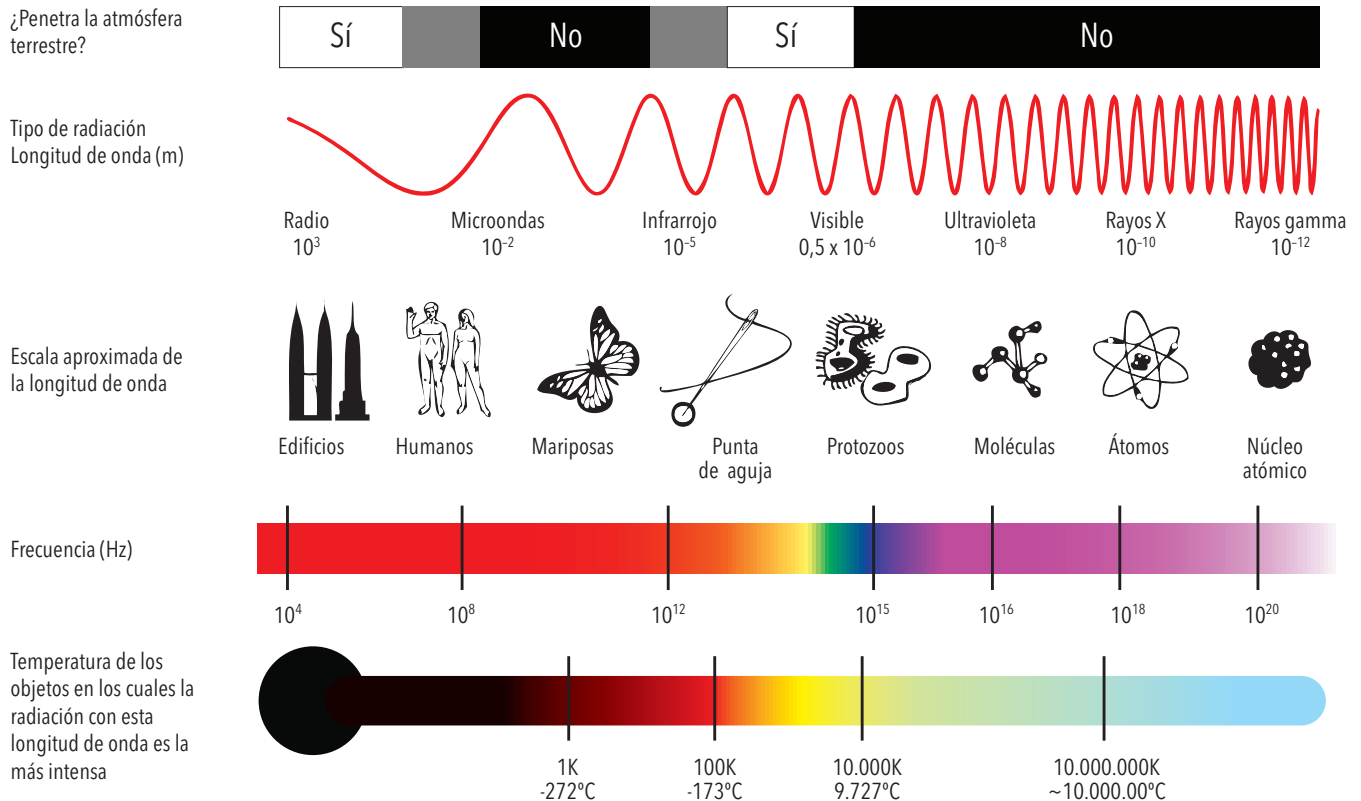
A una consulta sobre el uso práctico de esas ondas, Hertz respondió que no tenían ninguno, y que solo había demostrado la existencia de unas misteriosas ondas que no se ven, y que la teoría de Maxwell había previsto correctamente. Pero no mucho después, un pionero de la radio comentaba: *Hace tres años no había ondas electromagnéticas por ningún lado. Poco después, estaban en todas partes.*

Los usos del espectro

La utilización práctica de las ondas de radio comenzó en 1895 con el telégrafo inalámbrico, por el inventor

y empresario italiano Guglielmo Marconi (1874-1937), quien, junto con Karl Ferdinand Braun (1850-1918), recibió en 1909 el premio Nobel de física en reconocimiento de sus contribuciones a la *telegrafía inalámbrica* (cabe destacar que Marconi no había hecho estudios formales de física). Las primeras transmisiones de Marconi que atravesaron el canal de la Mancha datan de 1899; las que cruzaron el Atlántico Norte, de dos años más tarde. Las ondas se generaban entonces mediante una chispa, emitida en un rango muy amplio de frecuencias. Como consecuencia, pronto se advirtió que varios aparatos cercanos en funcionamiento simultáneo causaban interferencia entre ellos, lo que hacía difícil descifrar los mensajes.

Una aplicación inmediata del invento de Marconi fue el telégrafo costero para las comunicaciones marítimas, instalado en 1901 por primera vez en un barco comercial. Hasta ese momento la comunicación con los barcos —la única posible— se hacía mediante señales luminosas, generalmente desde faros, un recurso muy limitado aun en las mejores circunstancias. Para recibir un mensaje telegráfico, el barco debía conocer la frecuencia de transmisión de la estación costera. La mencionada posibilidad de interferencia, así como la necesidad de adoptar estándares comunes para los aparatos y para la sintonía entre transmisor y receptor, hicieron ver la conveniencia de reglamentar la nueva forma de comunicación. Esta-



El espectro electromagnético. Recibe ese nombre el conjunto de las ondas electromagnéticas de todas las frecuencias, como lo indica la figura. Una parte de ese espectro se suele denominar *espectro de radio* e incluye las ondas de frecuencias entre 10^4 y 3×10^{12} Hz, comprendidas las microondas. Nótese que en el gráfico la escala de frecuencias es logarítmica. Fuente http://commons.wikimedia.org/wiki/EM_Spectrum_Properties_es.svg

ba claro que la reglamentación debía ser internacional, dado que las ondas atravesaban las fronteras nacionales.

En 1903 tuvo lugar una reunión preliminar en Berlín, seguida en 1906 por la Primera Conferencia Internacional de Radiocomunicaciones, un encuentro intergubernamental realizado en la misma ciudad. El tema predominante de ambas reuniones fue la reglamentación de las comunicaciones marítimas, para mejorar la seguridad de la navegación. Cinco de los veintisiete participantes de la Primera Conferencia Internacional de Radiocomunicaciones eran países latinoamericanos: Argentina, Brasil, Chile, México y Uruguay, y se cuentan entre los signatarios de la Primera Convención Internacional de Radiotelégrafos, antecedente directa del actual Reglamento de Radiocomunicaciones.

La necesidad de reglamentar las comunicaciones marítimas se hizo más patente aún con la tragedia del *Titanic*, ocurrida en abril de 1912. El auxilio se retrasó varias horas debido a que el único operador de radio del *Carpathia*, el barco que se encontraba más cerca del sitio del accidente, se había ido a dormir unos veinte minutos antes del primer pedido de auxilio. El retraso aumentó significativamente la pérdida de vidas.

Telégrafo y telégrafo costero son ejemplos de estaciones de radio que transmiten desde una estación en movimiento a otra que permanece fija (transmisión de un barco a una estación costera) o entre estaciones fijas (transmisión de un telégrafo a otro). Casi de inmediato apareció la radiodifusión (o, como la conocemos hoy, la radio), de naturaleza muy distinta, ya que sus estaciones no transmitían a un receptor que permanecía fijo, sino a todos los receptores sintonizados a determinada frecuencia dentro de cierta área. Las transmisiones de radio —primero AM y después FM— fueron seguidas a fines de la década de 1930 por las de televisión.

Desde entonces los usos del espectro se han multiplicado rápidamente. La navegación marítima, y todavía más la aeronáutica, son inconcebibles hoy sin radiocomunicaciones. Los radares, desarrollados con fines bélicos durante la Segunda Guerra Mundial, tienen innumerables usos: navegación, meteorología, y hasta detección de cuerpos en el Sistema Solar que pueden poner en peligro a nuestro planeta.

En 1933 se descubrió la existencia de ondas de radio de origen cósmico, lo que abrió una nueva disciplina, la radioastronomía. La depresión económica y luego la Segunda Guerra Mundial, sin embargo, retrasaron su progreso por veinte años, pero en la década de 1950 diversos factores facilitaron su desarrollo. La radioastronomía revolucionó y sigue revolucionando nuestra visión del universo (véase el recuadro 'La radioastronomía, una ciencia vinculada con las comunicaciones').

Los satélites de comunicaciones en órbita geostacionaria, que parecen suspendidos sobre un punto fijo de la Tierra y que comenzaron a funcionar en la década de



Guglielmo Marconi (1874-1937), quien, en 1899 envió por primera vez mensajes por telegrafía inalámbrica a través del canal de la Mancha e inauguró así la utilización práctica de las ondas de radio. Recibió por ello el premio Nobel de física de 1909.

1960, no podrían existir sin emplear tecnologías avanzadas de radio. Las constelaciones de satélites en órbita baja terrestre, que son más recientes (por ejemplo, el sistema GPS), permiten determinar nuestra posición en la tierra, el mar o el aire con extraordinaria precisión. Radioaficionados de todo el mundo se comunican entre sí y en numerosas ocasiones han contribuido a aliviar situaciones dramáticas creadas por desastres naturales. Finalmente, en los últimos cuatro lustros, el desarrollo de las computadoras y la miniaturización, en combinación con tecnologías de radio, cambiaron radicalmente nuestro concepto de las comunicaciones personales mediante los teléfonos celulares, y estimularon una multitud de aplicaciones inalámbricas. Algunos ejemplos son los micrófonos inalámbricos, usados hoy universalmente en reuniones, salas de concierto, teatros y otros lugares de entretenimiento; los monitores, que permiten escuchar si el bebé llora en el cuarto de al lado (y a veces también el programa televisivo que escucha nuestro vecino) o el aparato inalámbrico que transmite el número de nuestra tarjeta de crédito cuando realizamos una compra. La cantidad de estas aplicaciones crece diariamente.

Nos despertamos al sonido de la radio que, además de transmitir su programación, sincroniza el reloj del receptor con la hora oficial. Terminamos el día viendo televisión,

usando internet o leyendo un libro que hemos descargado mediante ondas de radio captadas con una tableta. Y aunque la noticia que vemos en la televisión llegue por cable, muy posiblemente fue enviada desde el lugar donde ocurrió hasta el canal que la difunde por medio de ondas de radio. Hablamos con amigos que viven en otro continente, y gracias a satélites de comunicaciones vemos espectáculos deportivos o culturales transmitidos desde cualquier lugar del mundo, en el momento en que transcurren. Usamos el espectro cuando buscamos algo en internet y también para descargar programas de televisión o películas enteras.

Lo utilizamos cuando pedimos un radiotaxi, el que cada vez más recurre a un aparato GPS para que lo dirija hasta donde estamos y luego a nuestro destino. El avión en que viajamos despegue, navega y aterriza guiado por ondas de radio y, gracias a esas ondas, desde algunos aviones podemos acceder al correo electrónico y a internet durante el vuelo. Algunas bandas del espectro reciben la denominación de ICM (uso industrial, científico o médico) y se emplean para múltiples fines, principalmente los que no requieren transmitir información sino, por ejemplo, calentar o evaporar sustancias. En una de esas bandas, justamente, funcionan los hornos a microondas que empleamos para cocinar.

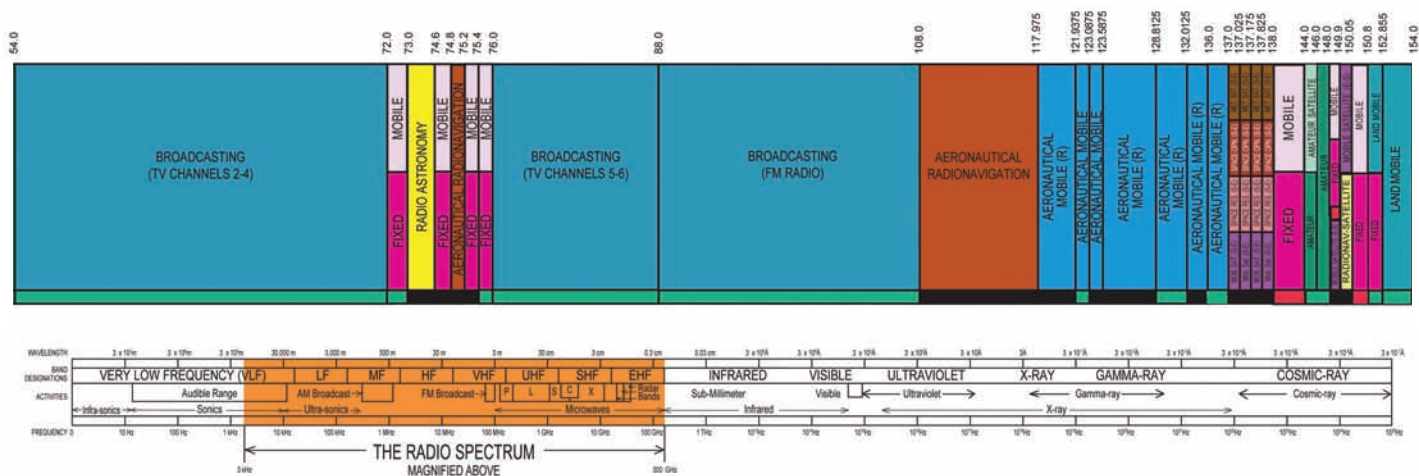
Existen numerosos usos científicos del espectro, algunos pasivos, como la radioastronomía, por cuanto se limitan a detectar señales de origen natural. Las ondas de radio de origen cósmico —o las de origen terrestre que se detectan desde satélites— son generalmente varias órdenes de magnitud más tenues que las señales generadas para comunicaciones, por lo que su detección requiere bandas libres de interferencia y equipos de alta sensibilidad. Entre los usos científicos activos del espectro se cuentan los estudios meteorológicos, por ejemplo, de huracanes, tornados o cobertura de nubes.

La reglamentación del espectro

De más está decir que esperamos que todas las aplicaciones mencionadas y muchas más operen sin interrupciones o interferencias, cosa que de hecho sucede en la inmensa mayoría de los casos. ¿Cómo se consigue que todo funcione?

Dada la posibilidad de interferencia entre estaciones de todo tipo situadas en distintos países y la necesidad de sincronizar transmisores y receptores independientemente de donde estén, es necesario reglamentar el uso del espectro tanto en el ámbito nacional como en el internacional. Cada país es soberano en cuanto a ese uso dentro de sus fronteras, y la mayoría de ellos tiene una o varias agencias responsables de la gestión del espectro de radio. La reglamentación internacional es necesaria para coordinar el funcionamiento de estaciones de radio que operan en distintos países y evitar las interferencias entre ellas. Se requiere también la reglamentación para que los sistemas satelitales, algunos de los cuales, como el GPS, tienen alcance global, puedan operar sin interferencias. Por último, las normas internacionales permiten estandarizar los equipos de radio, con la consiguiente economía de escala y posibilidad de usarlos en distintas partes del planeta.

Internacionalmente, la gestión del espectro está a cargo de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, un organismo especializado de las Naciones Unidas con sede en Ginebra, sucesor directo de la Unión Internacional de Telegrafía. El Reglamento de Radiocomunicaciones es un tratado internacional que la entidad administra con acuerdo de los gobiernos. La mayoría de los 193 estados miembros de la UIT también adopta el mencionado Reglamento para las comunicaciones dentro de sus fronteras (con algunas excepciones debidas a particulares situaciones locales). La UIT celebra conferencias mundia-



Porción del diagrama de asignación de frecuencias del espectro de radio en los Estados Unidos, 2003. El fragmento tiene en su centro la banda de FM, entre los 88 y 108MHz. Los colores diferencian los servicios; la mayoría de las bandas están atribuidas a varios de ellos. Las bandas azules, que predominan en frecuencias inferiores a 3GHz, están asignadas a radiodifusión (radio y TV). El gráfico inferior indica la ubicación del espectro radial en el marco más amplio del espectro electromagnético. Los lectores que quieran ver el diagrama completo lo podrán encontrar en alta resolución gráfica en <http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf>.

LA RADIOASTRONOMÍA, UNA CIENCIA VINCULADA CON LAS COMUNICACIONES

La radioastronomía es una rama de la disciplina astronómica que amplió enormemente nuestro conocimiento del universo. Desde sus comienzos estuvo vinculada con las radiocomunicaciones. Aunque hubo intentos anteriores, la primera detección de ondas de radio de origen cósmico se debió al ingeniero estadounidense Karl Jansky (1905-1950), que trabajaba en los Laboratorios Bell, en Nueva Jersey, e investigaba el origen de un molesto silbido, constantemente presente en las comunicaciones transatlánticas y en la telegrafía costera. En esa época se utilizaba para ese propósito la onda corta o banda de altas frecuencias (HF), que se extiende entre 3 y 30MHz. Jansky construyó una antena giratoria de 30m de largo por 4m de alto, bautizada jocosamente la calesita de Jansky. Después de numerosas observaciones, llegó a la conclusión de que una componente del ruido tenía una periodicidad de 23 horas y 56 minutos, igual al período sideral de las estrellas, y que ese ruido llegaba desde la dirección de la constelación de Sagitario, que coincidía aproximadamente con la del centro de la Vía Láctea, nuestra galaxia.

El descubrimiento fue publicado en la primera plana de *The New York Times* el 5 de mayo de 1933, pero la comunidad astronómica le prestó poca atención, debido posiblemente a su desconocimiento de las técnicas de radio y luego a la irrupción de la Guerra Mundial. Jansky, por su lado, ajeno a la astronomía, pasó a ocuparse de otros temas y murió a los cuarenta y cinco años.

El interés por la radioastronomía atrajo la atención de los astrónomos recién en la década de 1950, en buena medida porque un grupo de jóvenes científicos, que durante la guerra habían participado

en diversos países en el desarrollo del radar, buscaba nuevos temas de investigación. Su búsqueda coincidió con la disponibilidad de antenas parabólicas de radar, sobrantes del esfuerzo bélico. Ello condujo a que se establecieran grupos de investigación en Australia, Gran Bretaña, Estados Unidos y Holanda, que muy pronto hicieron contribuciones importantes a la nueva ciencia.

Los adelantos de la radioastronomía han estimulado y en algunos casos han contribuido directamente a las comunicaciones. Las señales cósmicas de radio son muy débiles: entre 6 y 12 órdenes de magnitud más débiles que las señales que manejan habitualmente las radiocomunicaciones. Como consecuencia, los radioastrónomos estuvieron continuamente a la vanguardia del desarrollo de amplificadores, que luego encontraron amplia aplicación en comunicaciones. Otras técnicas originalmente creadas para la radioastronomía, por ejemplo la síntesis de imágenes de regiones del cielo aprovechando la rotación terrestre, también tuvieron aplicación en las comunicaciones, además de otros campos prácticos. Por otro lado, técnicas puestas específicamente a punto para las comunicaciones o para la computación, como las de procesado cada vez más rápido de grandes volúmenes de datos, fueron rápidamente adoptadas por los radioastrónomos.

En este momento, la proliferación de satélites y la difusión masiva de todo tipo de aparatos inalámbricos son fuente de perturbaciones para científicos que aspiran a detectar señales cósmicas extremadamente débiles. Su difícil desafío es poder distinguir las en medio de la creciente cacofonía de señales de origen humano (otra razón que hace necesaria la reglamentación del uso del espectro).



Las antenas del observatorio Atacama Large Millimeter Array (ALMA) se recortan contra las nubes de Magallanes, que se distinguen en el cielo. Las instalaciones corresponden al proyecto de radioastronomía más avanzado de este momento, cuyo telescopio está compuesto por 66 antenas como las que se ven en la foto, emplazadas a unos 5000m sobre el nivel del mar en el desierto de Atacama, en Chile. Es una colaboración internacional en la que participan instituciones de Europa, América y Japón. Foto Christoph Malin, European Southern Observatory, http://www.almaobservatory.org/en/visuals/images?g2_itemId=1480.

