Revista de Ciencias

UVa

Parque Científico de la UVa

World Space Week

Marte: la búsqueda de vida extraterrestre

Visitando el CERN

Contaminación lumínica

Percepción acústica

Los sonidos del violonchelo

Facultad de Ciencias

Universidad de Valladolid

Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

Número 3. Noviembre, 2013

Revista de Ciencias

Índice de artículos

	Página
Editorial	3
El Parque Científico UVa con la transferencia Universidad-Empresa por Salvador Dueñas, Lourdes Rodríguez y Alma Escudero	5
La exploración de Marte: entre la decepción y la expectación por Abel Calle	8
Vida, Marte y Exomars por Alejandro Catalá Espí	17
La percepción acústica por Jesús Mariano Merino y Loida Muñoz-Repiso	21
Los sonidos *raros* del violonchelo por Arturo García	33
Contaminación lumínica: una asignatura pendiente Por Fernando Cabrerizo	38
Visitando el CERN por Abel Calle	43

http://www.cie.uva.es/revista_ciencias

ISSN: 2255-5943

Número 3. Noviembre, 2013

Editorial

A veces se ha aludido al tópico de la separación Universidad-Empresa para justificar que en la Sociedad se presenten por caminos separados; sin embargo, es difícilmente justificable el desarrollo universitario sin la proyección profesional. En el año 2007 se creó el Parque Científico de la Universidad de Valladolid por iniciativa conjunta con el Ayuntamiento de Valladolid la Cámara de Comercio y el Banco de Santander; a los que, posteriormente, se uniría la Junta de Castilla y León. La labor del Parque Científico es precisamente promover las relaciones entre los grupos de investigación de la UVa y las empresas que desarrollan su actividad en la región. Desde la Dirección del Parque nos presentan su actividad en el artículo: "*El Parque Científico UVa con la transferencia Universidad-Empresa*"

En 1999, la Asamblea General de Naciones Unidas declaró que durante los días 4 a 10 de Octubre de cada año se celebraría internacionalmente la Semana Mundial del Espacio (conocida en todo el mundo como WSW, del inglés *World Space Week*). La selección de fechas no es aleatoria y conmemora dos grandes eventos: en primer lugar el de Octubre de 1957, lanzamiento del primer satélite artificial fabricado por el hombre, *Sputnik 1*, con el que se inicia una nueva era de exploración espacial; además, el 10 de Octubre de 1967 tuvo lugar la firma del "Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes". La Semana Mundial del Espacio es una celebración internacional de la ciencia y la tecnología, y su contribución a la mejora de la condición humana. Los objetivos de la Semana Mundial del Espacio son: educar a las personas del mundo acerca de los beneficios que reciben del espacio, impulsar una mayor utilización del espacio para el desarrollo económico sostenible, manifestar el apoyo del público a los programas espaciales, estimular la curiosidad científica en los jóvenes y promover la cooperación internacional en la divulgación y educación sobre el espacio. Con este motivo, y como continuación a otras actividades que tuvieron lugar en nuestra región, se incluyen en la revista los dos artículos: "*La exploración de Marte*" y "*Vida, Marte y Exomars*" que ponen de manifiesto la transcendencia de la exploración planetaria en su papel en la búsqueda de vida extraterrestre.

En el número 2 de la Revista de Ciencias ya salió la primera parte de dos artículos dedicados a didáctica de la acústica; en aquélla ocasión se presentó "La percepción acústica: Física de la audición". En este número se presenta la continuación, a través del artículo "*La percepción acústica: Tono y timbre*"; este artículo tiene un marcado carácter didáctico, como el anterior, y se apoya en demostraciones multimedia accesibles desde el propio artículo, para hacer más comprensible su contenido, el cual formó parte de una Tesis Doctoral galardonada con el Premio de la Real Academia de Doctores de España en 2010 y por el Colegio de Doctores y Licenciados en 2011.

La colaboración de los alumnos de la UVa es de gran importancia en la difusión de los contenidos de la revista y aún lo es más la participación en su edición. En este número se presenta un artículo que corresponde a una investigación realizada sobre los sonidos del violonchelo, inicialmente titulado como "¡que viene el lobo!" haciendo referencia a un efecto acústico en el violonchelo. Este artículo "*Los sonidos raros del violonchelo"* desmenuza el efecto musical para explicar, a través de un análisis de armónicos, la información escondida en la reproducción musical.

En relación a la contaminación lumínica, la *Ley 34/2007* de calidad del aire y protección de la atmósfera la define como: «Contaminación lumínica»: El resplandor luminoso nocturno o brillo producido por la difusión y reflexión de la luz en los gases, aerosoles y partículas en suspensión en la atmósfera, que altera las condiciones naturales de las horas nocturnas y dificultan las observaciones astronómicas de los objetos celestes, debiendo distinguirse el brillo natural, atribuible a la radiación de fuentes u objetos celestes y a la luminiscencia de las capas altas de la atmósfera, del resplandor luminoso debido a las fuentes de luz instaladas en el alumbrado exterior.

Revista de Ciencias, 3, 3-4, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

Si bien hace hincapié en su afección a las observaciones astronómicas, lo menciona dentro del concepto general de "alteración de las condiciones naturales de las horas nocturnas" que ocasionaría otro tipo de afecciones a biodiversidad, paisaje, consumo energético, etc. El artículo *Contaminación lumínica: una asignatura pendiente* hace algunas sugerencias y menciona algunos factores importantes que pueden hacer compatible la seguridad de la iluminación con las observaciones astronómicas.

Durante los días 28 y 29 de septiembre el Centro Europeo de Investigación Nuclear, llamado CERN por su acrónimo en francés, ha abierto sus puertas a científicos y público en general para explicar sus laboratorios y los experimentos que allí se realizan. Como ya es conocido, las instalaciones del CERN se han hecho socialmente famosas, sobre todo, a partir del comienzo de funcionamiento del LHC, el gran colisionador de protones, donde ha tenido lugar el descubrimiento del "bosón de Higgs", (Peter Higgs y François Englert, premio Nobel de Física 2013). Por este motivo, la Sección de Física de la Universidad de Valladolid ha organizado una visita a las instalaciones del CERN para los alumnos del grado en Física. Con este viaje, y esperamos que otros le sucedan en el futuro, la Sección de Física intenta promover y hacer llegar a los alumnos la vanguardia de los experimentos más relevantes a nivel internacional. El artículo "*Visitando el CERN*" es una reseña de esta visita académica.

Abel Calle
Editor de la Revista de Ciencias
Universidad de Valladolid

Envía tus contribuciones a:

Editor de la Revista de Ciencias
Dpto. de Física Aplicada
Facultad de Ciencias. Paseo de Belén, 7, 47011-Valladolid
email: abel.calle@fa1.uva.es

El Parque Científico UVa con la transferencia Universidad-Empresa

La institución promueve las relaciones entre los grupos de investigación de la UVa y las empresas de la región

Salvador Dueñas
Director General del Parque Científico de la Universidad de Valladolid

Lourdes Rodríguez
Directora del Departamento de Proyectos del Parque Científico
de la Universidad de Valladolid

Alma Escudero
Departamento de Promoción y Comunicación del Parque Científico
de la Universidad de Valladolid

El Parque Científico Universidad de Valladolid es una fundación que inicia su actividad en 2007 por iniciativa de la Universidad de Valladolid, el Ayuntamiento de Valladolid, la Cámara de Comercio e Industria y el Banco Santander. En el año 2008, la Junta de Castilla y León se incorpora al proyecto. En el Patronato de la fundación están representadas estás cinco instituciones y cuenta con algunos de los más destacados investigadores de la Universidad de Valladolid. Asimismo, la fundación cuenta con un órgano de consulta y asesoramiento, denominado Consejo Científico, formado por investigadores de las cinco grandes áreas de conocimiento de la UVa. El Parque Científico UVa nace para potenciar la transferencia, la innovación y el emprendimiento en la comunidad universitaria y en el entorno empresarial.

Transferencia

El Parque Científico UVa promueve la transferencia de resultados de la investigación al mundo empresarial. Para ello cuenta con las instalaciones del edificio de I+D en el Campus Miguel Delibes y desde 2012 con una nueva infraestructura, el Centro de Transferencia de Tecnologías Aplicadas (CTTA), un edificio situado al final del Campus, con oficinas para empresas y con laboratorios para acoger a empresas innovadoras y spin-off de la UVa. La puesta en marcha del CTTA tiene una especial relevancia para el desarrollo estratégico de la Universidad de Valladolid; no sólo porque atrae a empresas innovadoras al entorno universitario, potenciando así la transferencia de las investigaciones, sino también porque su puesta en marcha es un estímulo para la creación de nuevas spin-off en la UVa y sobre todo un polo de atracción para el personal altamente cualificado.

Además, el Parque Científico UVa materializa la relación universidad-empresa mediante la presentación de proyectos de I+D conjuntos a convocatorias competitivas y a través de la suscripción de contratos al amparo del Art.83 de la LOU que se gestionan desde la institución. Estos contratos pueden estar promovidos tanto por Grupos de Investigación Reconocidos (GIR) como por Personal Docente e Investigador (PDI) no adscritos a ningún grupo de investigación en el ámbito tanto de las ciencias como de las humanidades.

Revista de Ciencias, 3, 5-7, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

Centro de Transferencia de Tecnologías Aplicadas (CTTA)

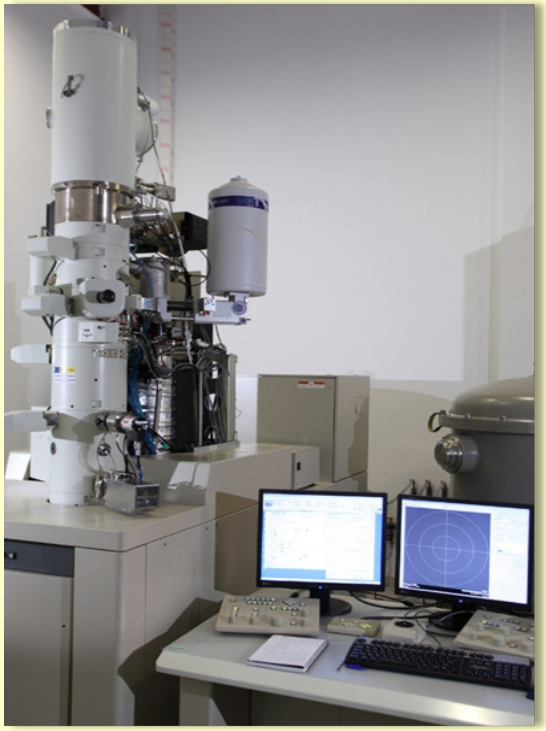
Innovación

De cara a promover la innovación, el Parque Científico UVa tiene una oferta de servicios expertos para el entorno universitario que ofrece acceso a equipamiento científico-tecnológico de última generación, así como programas específicos de gestión de la I+D.

En este sentido, el Parque Científico UVa pone a disposición de los investigadores de la UVa una Unidad de Microscopía Avanzada compuesta por tres equipos de última generación (ESEM y dos TEM), dotados de gran versatilidad y amplio rango de aplicación. La Unidad de Microscopía Avanzada consta de:

Un microscopio electrónico de barrido ambiental ESEM-Quanta 200F que posibilita el estudio combinado de la morfología de la muestra y de su composición, permite el análisis de muestras no conductoras sin preparación previa y de muestras húmedas; y está equipada con un detector de rayos X.
Dos microscopios electrónicos de transmisión: El TEM JSM 1011 con un voltaje de aceleración máxima de 100 kilovoltios que es adecuado para el análisis, entre otras, de muestras biológicas al ser más sensibles a la irradiación de electrones. Y el TEM-JSM 2200FS de emisión de campo que es capaz de realizar un análisis integral de una muestra material y/o biológica.

La Unidad de Microscopía Avanzada da servicio tanto a investigadores como a empresas de diferentes sectores industriales. En concreto, puede analizar materiales cerámicos, metálicos, semiconductores, polímeros y biológicos. También tiene aplicaciones en el desarrollo de nuevos materiales, en las ciencias de la vida, con estudios celulares y moleculares, tejidos animales y vegetales; así como en la reconstrucción de estructuras en 3D por tomografía de transmisión.



Microscopio Electrónico de Transmisión
TEM-JSM 2200FS

Emprendimiento

En materia de emprendimiento, el Parque Científico UVa viene realizando un notable esfuerzo por promover la cultura emprendedora en el seno de la Universidad de Valladolid; para ello son de vital importancia los programas de creación de empresas desarrollados en colaboración con la Agencia de Innovación y Desarrollo Económico del Ayuntamiento de Valladolid. Y de forma muy singular, el desarrollo de la línea de creación de empresas del Proyecto T-CUE (Transferencia de Conocimiento Universidad-Empresa) impulsado por la Junta de Castilla y León, cuyo apoyo financiero es clave en la mejora de la oferta de servicios del Parque Científico UVa a los emprendedores.

Durante este tiempo se han realizado numerosas actuaciones dirigidas tanto a alumnos como a profesores-investigadores de la universidad para dar a conocer el emprendimiento como una opción de futuro. A lo largo del curso se realizan charlas, talleres y jornadas en colaboración con todos los centros de la UVa.

Como resultado, el Parque Científico ha impulsado la creación de 66 empresas, algunas de ellas promovidas por investigadores de la UVa, desde que la Universidad atribuyó las competencias en materia de creación de empresas al Parque Científico.

Animamos a todos los miembros de la UVa a acercarse a su Parque Científico y comprobar de primera mano todos los servicios que esta institución les ofrece. Estaremos encantados de recibir y apoyar todas vuestras ideas y proyectos.

La exploración de Marte: entre la decepción y la expectación

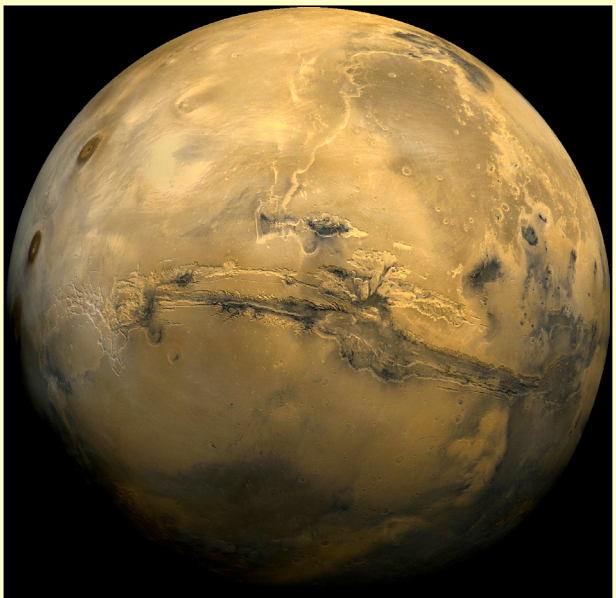
Abel Calle
Dpto. de Física Aplicada. Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid

Ares para los griegos y Marte para los romanos, se presenta con su peculiar color rojizo. Hablar de Marte es plantearse qué es la vida y buscar un planeta espejo al nuestro en el que mirar para vislumbrar el futuro lejano de la Tierra. La exploración de Marte pasó de la decepción a la expectación cuando los datos de las misiones espaciales que lo han visitado nos han hecho cambiar la percepción sobre lo que debemos buscar en Marte. Tanto es así que los éxitos y el aprendizaje extraído de la exploración de Marte reside, más que en el hallazgo de resultados, en el planteamiento de la búsqueda en sí misma.

Introducción

Marte jugó un papel esencial en la definición del Sistema Solar copernicano y la configuración de las órbitas de los planetas. Aunque todos los planetas presentan la figura del epiciclo sobre el fondo de las estrellas, en el caso de Marte el efecto de "marcha atrás" era mucho más prominente, por lo que contribuyó, primero, a dar robustez al modelo de Copérnico y, después, al ajuste de las órbitas de los planetas de acuerdo a las leyes de Kepler.

Marte es el cuarto planeta y último de tipo terrestre. Su aspecto rojizo le viene de la abundancia de oxidantes en su superficie, bañada por una intensa radiación ultravioleta (letal para la vida). Sus días son prácticamente idénticos a los de la Tierra y presenta estaciones climáticas como la Tierra, consecuencia de la inclinación de su eje de rotación 25º (parecidos a los 23.5º de la Tierra) lo que provoca variaciones estacionales de los casquetes polares y en su atmósfera. Hoy se sabe que el agua líquida ha fluido en su superficie y de forma estable, porque hay evidencias de lechos lacustres secos y antiguos cauces fluviales. Y por lo que respecta a su evolución geológica no es de los más antiguos, como Mercurio y la Luna cuyas superficies craterizadas muestran que no han sido renovadas en mucho tiempo; Marte ha renovado su superficie por efecto de la erosión, la actividad volcánica y el agua; sin embargo también muestra grandes cráteres de impacto. Actualmente el agua líquida no es estable en su superficie: la temperatura (una media de –50ºC) y presión (1% de la terrestre) son tan bajas que sólo puede haber vapor de agua y hielo. No hay evidencia clara de moléculas orgánicas; a este respecto sólo nos queda buscar evidencias en el registro geológico.



Mosaico de imágenes tomadas por el orbitador *Viking–1*. Destaca el color rojizo de su superficie debido a la abundancia de óxidos de hierro (NASA)

A pesar de que Marte es el planeta más visitado por el hombre, sea con orbitadores o con *rovers* de exploración, no es el planeta más interesante del Sistema Solar. Hoy conocemos que en Titán

Revista de Ciencias, 3, 8-16, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

(Saturno) existen lagos de metano líquido, que Tritón (Neptuno) es el tercer cuerpo del Sistema Solar con mares líquidos en su superficie –de nitrógeno en este caso– tras Titán y la Tierra; o que Encélado (Saturno) y Europa (Júpiter) esconden sorpresas bajo una corteza helada resquebrajada. Sin embargo Marte es nuestro planeta cercano, pudo haber sido habitable y tuvo agua en su superficie y lo que le trajo al estado actual bien pudo ser un drástico cambio climático. Por ello, no es exagerado afirmar que el destino de nuestro planeta puede pasar por etapas similares a Marte o darnos respuestas acerca de la evolución de la vida. Ahí reside el interés de su exploración.

El interés de la exploración de Marte se encuentra resumido en tres preguntas clave: 1) *¿La vida se forma dondequiera que el agua líquida sea estable o precisa alguna condición más?*; esta pregunta proviene del hecho de que le otorgamos gran importancia al agua como elemento indispensable para que tengan lugar las reacciones químicas conducentes al desarrollo de la vida; Marte tuvo agua (éste es un resultado objetivo, hoy día) y buscamos si fue habitable. 2) *¿Hay vida en Marte?* Hoy día las posibilidades de encontrar vida se agotan; sin embargo aún siguen desarrollándose misiones para buscar en la sub-superficie (misión europea *Exomars*) último reducto que queda sin analizar; en todo caso, hoy día nos conformaríamos con saber que la ha habido; esa sería ya una buena respuesta. 3) *Si la vida apareció en Marte: ¿qué ocurrió después?*, es decir, si Marte fue habitable, ¿qué cambios tuvieron lugar en el planeta para que hoy no lo sea?

La expectación

La expectante historia de la observación de Marte comienza en el siglo XIX, con los mapas de su superficie generados por Giovanni Schiaparelli (1835-1910) quien elaboró toda una red de intrincados canales, a partir de las observaciones que realizó aprovechando las posiciones de Marte en oposición, que se producen cada 26 meses; posteriormente, Percival Lowell (1855-1916) astrónomo aficionado llevó el término "*canali*" a sus últimas consecuencias al publicar varios artículos en el New York Times dedicados a la existencia de vida en Marte; el asunto no habría pasado de anécdota si Lowell no hubiera sido un astrónomo de prestigio, como lo justifica sus aportaciones a la teoría de la evolución de los planetas, la expansión del universo y su contribución al descubrimiento de Plutón.

En realidad el siglo XIX fue una completa confusión entre ciencia y literatura, en lo que respecta a Marte. Tres años después de que Lowell edificara su observatorio, H.G Wells publicó su famosa obra "la guerra de los mundos" cuya emisión radiofónica, a cargo de Orson Welles en 1938 en la emisora CBS, provocó un caos en la ciudad de New York cuando la población que se incorporó tarde a la narración, se tomó en serio la invasión marciana.

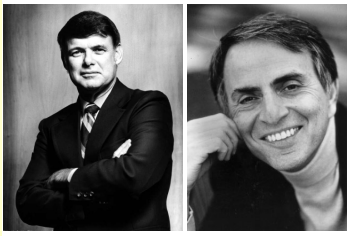
Percival Lowell (1855-1916), observando con su propio telescopio

Los grandes científicos que diseñaron las más importantes misiones al planeta rojo leyeron las novelas de Marte de Burroughs y las crónicas marcianas de Ray Bradbury. Tanto es así, que el día anterior a que la misión *Mariner-9* llegara a Marte en 1971, tuvo lugar una reunión en el Instituto Tecnológico de California, en Pasadena entre dos científicos: Carl Sagan (astrónomo investigador y uno de los responsables e las misiones *Viking*, entre otras) y Bruce Murray (director, por aquel entonces del *Jet Propulsion Laboratory*), dos escritores de ciencia ficción: Ray Bradbury y Arthur Clarke, y un periodista: el editor científico del New York Times, Walter Sullivan. El motivo de tan peculiar reunión era autoplantearse la pregunta de si estamos preparados para lo que nos vamos a encontrar en Marte. En todo caso, el sentir de aquéllos momentos se resume en la siguiente frase que pronunció Murray: "*De alguna forma, Marte se ha extendido y perdurado más allá del reino de la ciencia y se ha aferrado, con tanta fuerza a las emociones y los pensamientos humanos que ha distorsionado la opinión científica acerca de él. Así que no ha sido sólo la mente popular, la que se ha formado una opinión errónea, sino también la mente científica. Queremos que Marte sea como la Tierra. Existe un deseo profundamente enraizado de encontrar otro lugar en el que podamos empezar de nuevo*".

La exploración de Marte está vinculada a la astronáutica, de la que se sirve para el lanzamiento y puesta en operación de las misiones espaciales, orbitadores, estaciones y laboratorios de análisis y

rovers de superficie. Por ello, merece la pena realizar un brevísimo repaso a los orígenes de la astronáutica en aquéllos países que tuvieron parte activa.

Bruce Murray Carl Sagan



Reunión en Inst. Tecnológico de California, Pasadena. el12 de Noviembre de 1971. Día anterior a la llegada a Marte de Mariner-9**: ¿Estamos preparados?**

Ray Bradbury Arthur Clarke Walter Sullivan

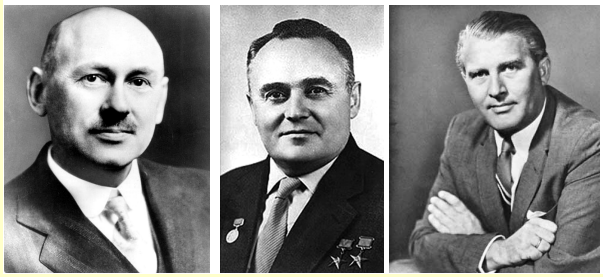
Los orígenes de la astronáutica

Los orígenes de la cosmonáutica en la URSS están representados por Konstantin Tsiolkovsky (1857-1935) quien estableció la fórmula fundamental de la astronáutica, que hoy se enseña en las universidades y que explica el movimiento de propulsión de los cohetes. Su obra "La exploración del espacio cósmico por medio de los motores de reacción" publicada en 1903 describe, por primera vez, la posibilidad de viajar a través del espacio extra atmosférico por medio de la propulsión de cohetes a reacción y las ecuaciones geoestacionarias. No obstante es Serguéi Koroliov (19 07-1966) el que ha transcendido a la literatura espacial gracias a sus desarrollos de ingeniería que dieron lugar al lanzamiento del primer satélite artificial, el *Sputnik*, el 4 de octubre de 1957 desde el cosmódromo de Baikonur, en Kazakhstán y que inició la carrera espacial en todo el mundo. El mismo cohete lanzador *Vostok-1*, desarrollado por Koroliov, fue utilizado para poner en órbita el primer ser vivo, la perra *Laika*, un mes después y el primer cosmonauta, Yuri Gagarin el 12 de abril de 1961, quien consiguió orbitar la Tierra a 327 km de altura. Brillante tecnología cuando el lanzador actual más emblemático de Rusia, el *Soyuz*, es una versión mejorada no muy diferente al desarrollado por Koroliov; y brillante comienzo para la URSS que marcaba la vanguardia de la exploración espacial en una época en que la guerra fría estaba requiriendo una reacción rápida por parte de EEUU.

Esta precipitación fue, precisamente, la responsable de diversos fracasos americanos, como la explosión, en la plataforma de lanzamiento de la misión *Vanguard TV3*, en Diciembre de 1957, un programa para colocar un satélite en órbita alrededor de la Tierra para determinar la densidad atmosférica y otras medidas geodéticas. La revancha científica por parte de EEUU vendría desde el lanzamiento del satélite *Explorer*, en enero de 1958, la misión científica que descubrió los cinturones de radiación alrededor de la Tierra, denominados *Van Allen*, el nombre del científico que junto a Von Braun, como ingeniero de cohetes y Pickering como gestor del JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) de la NASA fueron los responsables del estreno americano en la conquista del espacio.

Los orígenes de la astronáutica en EEUU están representados por Robert Goddard (1882-1945) quien consiguió lanzar 34 cohetes entre 1926 y 1941, alcanzando alturas de 2.6 km. El mérito de Goddard fue, sin duda, llevar adelante sus desarrollos sin financiación (o la poca que le consiguió el aviador Charles A. Lindbergh, que había realizado hacía poco la histórica travesía New York–París). Goddard fue ridiculizado en periódicos de prestigio como New York Times aludiendo a su locura de pretender que un cohete podría, algún día, desplazarse por el espacio vacío. Sus avances tuvieron lugar en el uso, por primera vez, de combustible líquido. Este ataque, al científico tan relevante que dio nombre al *Goddard Space Fligth Center* de la NASA, tuvo que ser traducido en disculpas públicas muchos años después.

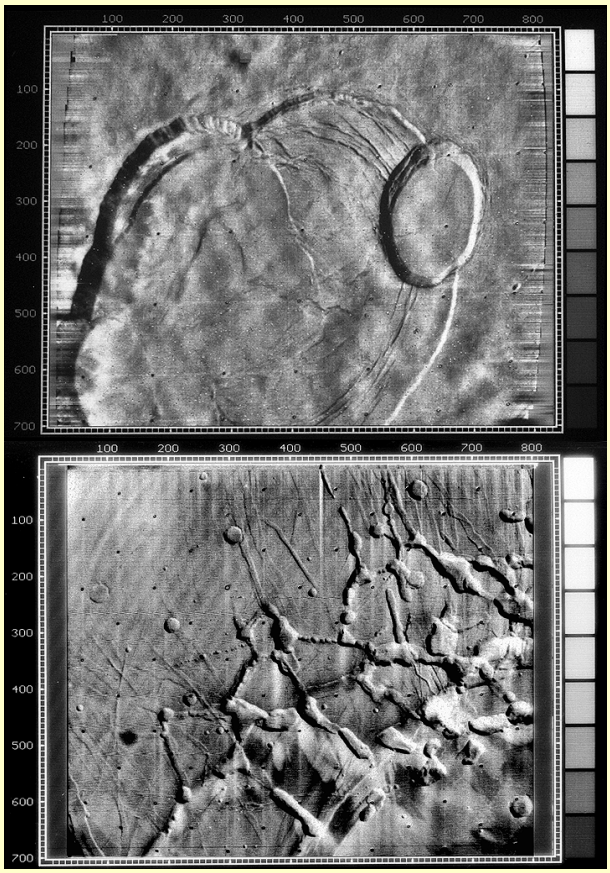
Robert Goddard (1882-1945) Serguéi Koroliov (1907-1966) Werner Von Braun (1912-1977)



Pero sin duda, la historia de la astronáutica de EEUU comenzó en Alemania. Allí, Hermann Oberth (1894-1989) lanzó su primer cohete en 1929. Profesor de Werner Von Braun (1912-1977), encargado del desarrollo de las bombas V-2. La invasión de Alemania por EEUU, durante la segunda guerra mundial tenía por objeto llevar a cabo la operación *Paperclip* por la que EEUU trasladaría a un grupo numeroso de científicos e ingenieros encabezados por Von Braun. Éste trabajó felizmente en EEUU, donde encontró una adecuada financiación para sus proyectos y disfrutó de unos años históricos en que las misiones *Apollo*, enviadas a la Luna y promotoras también de la construcción de la estación espacial *Skylab* fueron una prioridad estratégica de los responsables políticos de la financiación.

Primeras misiones

La misión *Mariner-4*, cuya misión era la de caracterizar la atmósfera de Marte, sobrevoló el planeta en julio de 1965 y su objetivo era medir la atmósfera de Marte emitiendo una señal de radio a la Tierra por ocultación. El conocimiento de la atmósfera era crucial para enviar sucesivas misiones que consiguieran orbitar el planeta por frenado atmosférico (*aerobraking*); emitió la primera imagen de su superficie: un panorama desértico y craterizado. Tan sólo 11 días después de que Neil Armstrong pisara la Luna, la *Mariner-6* llegó a Marte (e inmediatamente después la *Mariner-7*) cuyos objetivos eran el estudio de los polos encontrando que el polo sur estaba formado de dióxido de carbono helado (hielo seco); también constataron que la superficie de Marte estaba bañada de intensa radiación ultravioleta. Como diría Murray (director del JPL) en rueda de prensa: "*El hielo seco se convirtió en el último clavo del ataúd de un Marte similar a la Tierra*".



Imágenes de Mariner-9, primera misión que orbitó Marte, en 1971. Arriba: Caldera del *Olympus mons;* abajo: *Valles Marineris*: valles, fallas y depresiones causadas por la erosión.

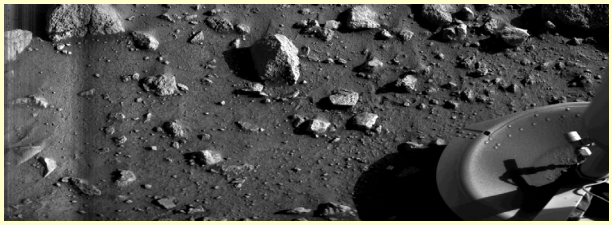
La *Mariner-9* se insertaría en la órbita de Marte en 1971, convirtiéndose en la primera misión espacial que orbitó el planeta; sería la misión que emitiría datos concluyentes y objetivos, una vez que cubrió el 85% de la superficie, con una resolución de entre 1 y 2 km. A *Mariner-9* se debe el descubrimiento de los accidentes orográficos más prominentes de Marte: el *Olympus Mons* en la región de los grandes volcanes de *Tharsis*, el volcán más alto del Sistema Solar, con una altitud de 27 km; el *Valles Marineris*, un cañón de 5000 km de longitud y 11 km de profundidad; la región de *Chryse Planitia*, una intrincada red de canales entrelazados, producidos por antiguas inundaciones. Por todo ello, *Mariner-9* devolvió la expectación a la exploración de Marte: en efecto, Marte no es como la Tierra, pero tampoco se parece a la Luna o Mercurio; aunque tiene cráteres, también presenta una superficie en renovación.

Aunque otras misiones fueron fallidas, el éxito de las misiones americanas se debió a que las misiones se lanzaban por pares y, además, no estaban pre-programadas sino que realizaban maniobras "en tiempo real" adaptándose a las condiciones de un planeta donde las tormentas de arena son frecuentes; a diferencia de las misiones de la URSS, que fueron fallidas todas y ello a pesar de que lanzaron misiones como la *Zond-2,* semejantes a las *Venera* que habían alcanzado Venus con éxito. También probó la URSS con misiones que llevaban módulos de descenso (además de los orbitadores) para la medida de condiciones meteorológicas, como las *Mars-2, -3 y -6* (entre 1971 y 1976), pero resultaron fallidas precisamente por la existencia de tormentas de arena producidas en la llegada a Marte.

Misiones *Viking* o el debate de la vida

Sin duda, el debate científico más interesante acerca del planteamiento de la existencia de vida extraterrestre se produjo en la preparación de los experimentos a bordo de las misiones *Viking*. El término de "exobiología" ya había sido utilizado por Joshua Lederberg, Nobel en Medicina, para describir el estudio de la existencia de vida fuera de la Tierra y estudiar el riesgo de bio-contaminación relativo a los vuelos espaciales que podrían contaminar ecosistemas de bacterias en el espacio exterior o en otros planetas; sin embargo fue durante la preparación de las misiones *Viking* cuando la astronáutica tuvo que frenar sus desarrollos a la espera de establecer una definición de la vida y un planteamiento acorde para plantearse qué había que buscar en Marte. Hay que destacar el punto de vista del científico más entusiasta relacionado con Marte: Carl Sagan (1934-1996), quien defendía olvidarse de los tópicos aplicados a organismos vivos: nacer, reproducirse y consumir energía, y centrar los esfuerzos en buscar desequilibrios termodinámicos; esto es, algo improbable. Su definición es acorde con el principio de entropía y extiende el concepto de

vida a situaciones de contexto: un obelisco de piedra, en Marte, sería indicio de vida.



Primera imagen transmitida de la superficie de Marte (*Viking 1 Lander*, 20 de julio de 1976).

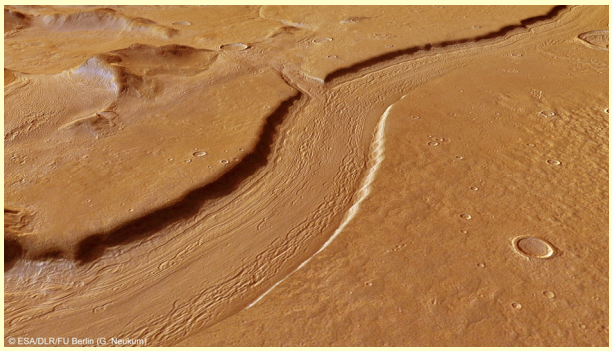
Pero, sin duda, el que hizo mayores aportaciones fue el genetista Norman H. Horowitz (1915–2005) quien aportó dos ideas claves: Los organismos vivos son complejos y, además, los organismos vivos se reproducen y evolucionan; la evolución significa transmitir la información genética, en la reproducción, y transmitir también sus mutaciones; y ello se realiza gracias a la química del Carbono, por ser éste el elemento de la naturaleza que presenta mayor número de combinaciones posibles para formar compuestos. Las misiones *Viking* llevaban tres experimentos para la búsqueda de vida, siendo Horowitz el que diseñó uno de los seleccionados por la NASA para ser implementados en las *Viking*. Se trataba del "experimento pirolítico"; consistía en una cápsula con CO_2 radiactivo, para ser usado como marcador. Se esperaba que microorganismos presentes en la tierra de Marte asimilarían el CO2 (su atmósfera contiene un 95%) y después se calentaría la tierra esperando encontrar restos del isótopo del CO2 asimilado por los microorganismos. Hubo otros experimentos parecidos pero que usaban oxígeno. Horowitz decía que si había vida en Marte, asimilaría CO_2 en lugar de oxígeno, porque habría evolucionado para adaptarse a las condiciones del planeta. En todo caso, y como consecuencia de aquéllos debates se establecieron tres objetivos en la búsqueda de vida: agua, energía y carbono.

Las *Viking* llegaron a Marte en julio de 1976, esterilizadas para evitar contaminar biológicamente el planeta y con tres experimentos para la búsqueda de vida. Sin embargo los resultados no fueron concluyentes y nos transmitieron unas imágenes de la superficie de Marte (*Chryse Planitia,* por *Viking-1* y *Utopia Planitia* por *Viking-2*) muy parecidas a los desiertos de la Tierra. Marte presenta una marcada diferencia entre los hemisferios norte, llamado de tierras bajas donde predominan las llanuras y el hemisferio sur, de las tierras altas, donde predominan los accidentes orográficos. Las *Viking* se posaron en lugares seguros del hemisferio norte, para evitar riesgos en la misión, y por ello no eran los lugares más interesantes de Marte a juzgar por los datos transmitidos por las misiones posteriores.

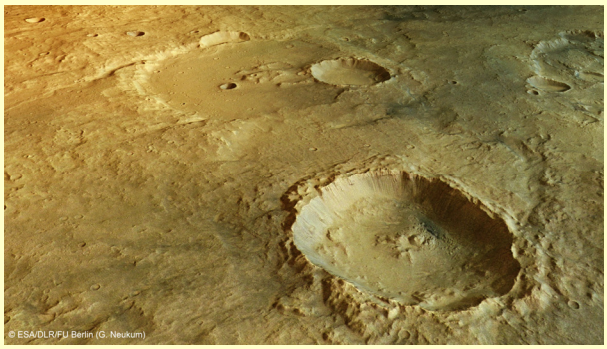
En todo caso no debemos olvidar la valiosa aportación de los propios orbitadores *Viking,* que ayudaron a establecer la configuración definitiva de la superficie de Marte, además profundizar en el conocimiento los polos del planeta; el casquete polar norte, de mayor tamaño, contiene hielos de agua y de dióxido de carbono. El sur, más reducido, consiste de dióxido de carbono y experimenta fuertes cambios estacionales. La elipticidad de la órbita e inclinación del eje de rotación provoca largos veranos en el sur y fríos inviernos en el norte. El estudio de las variaciones estacionales de los polos aportará conclusiones relevantes en el estudio de los cambios climáticos experimentados en Marte.

Misiones orbitadores

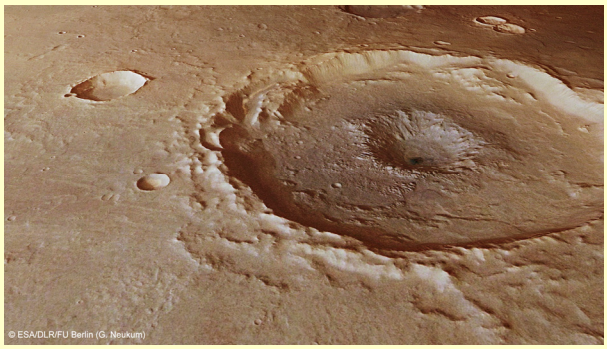
La primera misión enviada a Marte se produjo 20 años después de las *Viking*, cuando en noviembre de 1996 se lanzó la MGS (*Mars Global Surveyor*), una misión que ha proporcionado una gran cantidad de información. Uno de sus sensores era el MOLA (*Mars Orbiter Laser Altimeter*) que ha sido el encargado de generar el mejor mapa digital del terreno de la superficie marciana, midiendo el tiempo invertido para que un haz de láser transmitido llegue a la superficie, se refleje y vuelva. MGS, además del altímetro, portaba una cámara que ha captado imágenes de Marte en que se pueden distinguir grandes corrientes fluviales, hoy secas. A la vista de sus imágenes no cabe la duda de que en Marte hubo agua estable en la superficie; sin embargo las condiciones actuales en su superficie, baja presión y baja temperatura no permiten la existencia de agua líquida, lo que permite suponer que en Marte hubo un fuerte cambio climático que alteró las condiciones físicas en la superficie. A la MGS le seguiría la *Mars Odyssey*, en una órbita cuasi polar, cuasi circular.



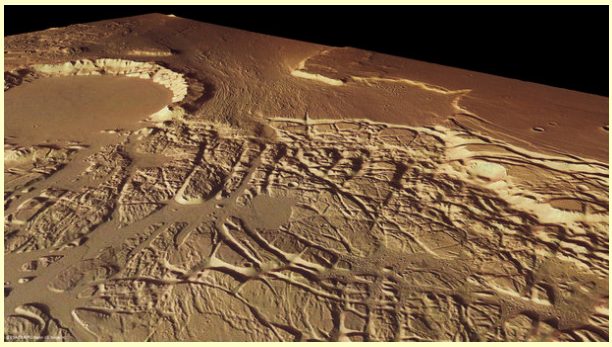
Cámara HRSC de *Mars Express*+MDT; (16 m por píxel). Muestra un pequeño canal afluente que se une a un canal principal; los rasgos lineales del fondo del lecho son evidencia de hielo y escombros sueltos raspando el suelo, análogamente a como se produce en los glaciares de la Tierra. ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum).



MarsExpress: deslizamientos de tierra en uno de los cráteres más profundos. ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum).



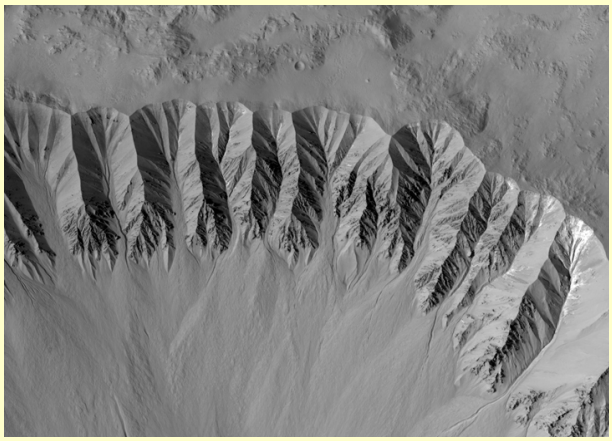
MarsExpress: cráter de diámetro 50 Km. Thaumasia Planum. El 'pit' central de este cráter formó por una explosión subterránea; el calor vaporizó agua o hielo subterráneo. ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum).



MarsExpress: el cráter tiene 35 km. El resto son zonas erosionadas por inundaciones de agua. ESA

El orbitador europeo *MarsExpress* ha proporcionado imágenes a alta resolución (10 m/pixel) y áreas seleccionadas a 2 m/pixel, así como mapas de la composición mineral a 100 m de resolución. También han sido relevantes los resultados de la composición de la atmósfera y su circulación global. Especialmente significativo ha sido el descubrimiento de metano en la atmósfera de Marte; notar que la atmósfera marciana está compuesta de CO_2 al 95% más 5% de gases traza (oxígeno, agua, CO, formaldehidos y CH_4). El metano, a menos que sea continuamente producido por una fuente, sólo es estable en la atmósfera de Marte unos 300 años (se oxida para formar H_2O y CO_2, presentes en la atmósfera). Por lo tanto debería haber un mecanismo para "rellenar" la atmósfera con metano. Esta línea de investigación permanece aún abierta, pero ha sido uno de los resultados más impactantes.

Otro orbitador que ha generado imágenes de alta resolución de la superficie ha sido el MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter*), cuya cámara HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*) es básicamente un telescopio dedicado a la discriminación de minerales, a una resolución de entre 30 y 60 cm.



MRO/HiRISE: Cráter "reciente" formado por cárcavas; dentro del cráter no existen; cráter es de impacto con erosión posterior por agua. NASA.

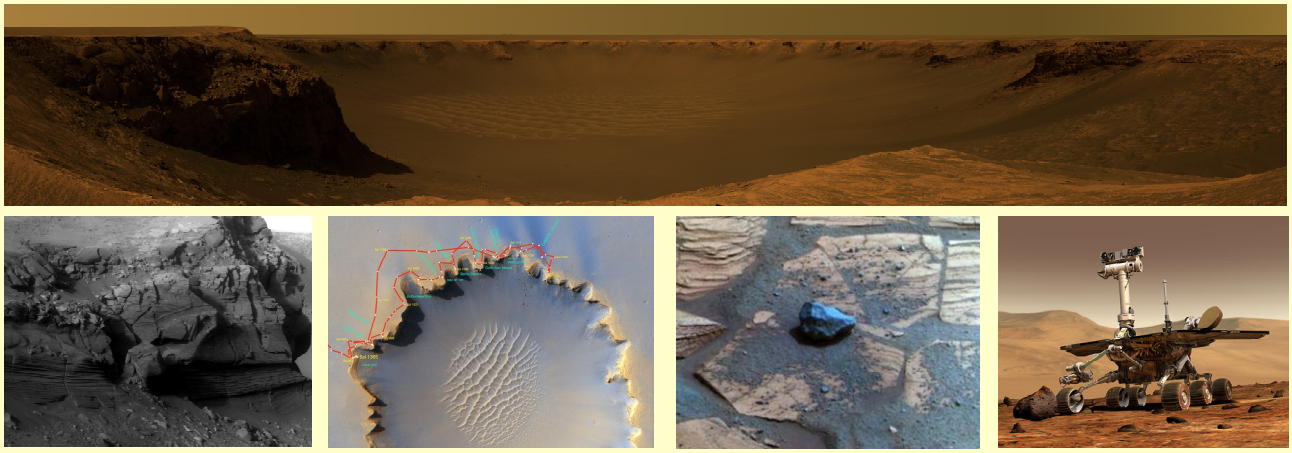
MRO/HiRISE: Dunas en el cráter Arkhangelsky
Las bandas espectrales de HiRISE sirven para discriminar tipos de cubiertas. NASA

High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) es uno de los 6 instrumentos de MRO de la NASA

Los *rovers* de exploración

Resulta curioso pensar que hemos aprendido grandes cosas de Marte analizando los meteoritos encontrados en la Tierra que proceden de Marte; en la actualidad existe 12 rocas catalogadas como marcianas; uno de ellas, encontrada en la Antártida en 1984, permitió el análisis de sustancias carbonáceas que sólo se forman en presencia de agua. Sus resultados publicados en un número de la revista *Science*, (bajo el título "*Búsqueda de vida antigua en Marte: posible vestigio de actividad biogénica en el meteorito marciano ALH 84001*", *Science* 16 August 1996, vol. 273 no. 5277 pp. 924-930) infundieron el interés de la superficie de Marte que había estado en declive y tuvo la consecuencia de que la NASA comenzara a financiar las misiones rovers. El intercambio de material entre la Tierra y Marte ha tenido que ser frecuente en la historia de los planetas. Incluso más probable es que material de Marte haya llegado a la Tierra debido a su menor gravedad; y no sería descabellado pensar que hemos intercambiado vida en ese material.

En diciembre de 1996 se lanzó la misión *Mars Pathfinder*, con un rover a bordo denominado *Sojourner*, dotado con un espectrómetro de rayos X, partículas Alfa y protones cuyo objetivo era identificar distintos tipos de minerales. En 2003 se lanzarían los dos rovers gemelos *Spirit* (junio) y *Opportunity* (en julio). Hay que destacar que las misiones rover aportan datos complementarios a los que estaban proporcionando los orbitadores; su objetivo era la identificación de minerales asociados al agua líquida: carbonatos, arcillas y sales, principalmente. Estos compuestos no habían sido identificados por *Mars Global Surveyor* y *Mars Odyssey,* aunque los orbitadores sí descubrieron barrancos recientes, viejos litorales y lechos de lagos. En todo caso, el mineral clave era la hematites gris, mineral que se forma en agua líquida, en un estrato fino y plano y que bien podría encontrarse en las regiones del cráter *Gusev* (*Spirit*) y la región de *Meridiani* (*Oppotunity*), las cuales podrían ser el lecho de grandes lagos.



Secuencia de imágenes para detallar la coordinación de observaciones entre rovers y orbitadores. Arriba, imagen panorámica del cráter Victoria, tomada por *Opportunity*. De izda a dcha: 1) Talud de estratos geológicos del mismo cráter. 2) Imagen del cráter Victoria tomada por la cámara HiRISE del orbitador MRO, en alta resolución espacial; se ha dibujado la trayectoria de *Opportunity* para tomar la imagen de arriba. 3) Roca meteorito procedente del impactador que provocó el cráter Victoria. 4) *Opportunity*, representación artística

Phoenix fue un rover laboratorio para análisis geológico, posado en altas latitudes del hemisferio norte, 68 grados de latitud norte, para estudiar los cambios estacionales en los polos durante el verano

marciano. Encontró hielo. En el invierno, en esta latitud, el dióxido de carbono forma una capa de escarcha en la superficie de varios decímetros de espesor (hielo seco). En la primavera y el verano esta escarcha se disipa por sublimación.

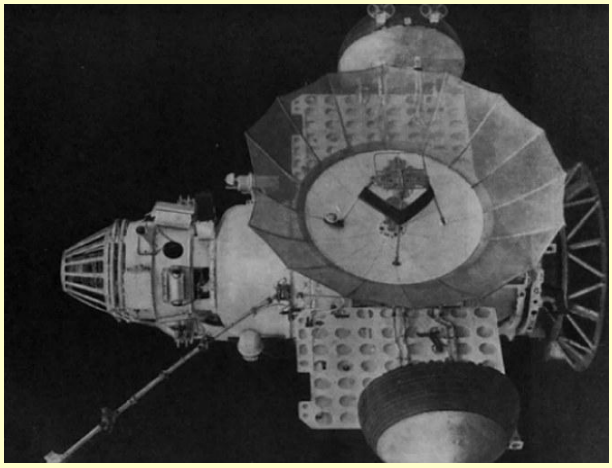
Finalmente, el laboratorio *Curiosity*, ha estado estudiando el cráter Gale, una montaña de 5 km (de alto). Sus capas cuentan la historia de Marte en el pasado. Los estudios desde órbita revelan que las capas están formadas por diferentes materiales dependiendo de su altura. Lo más relevante de *Curiosity* ha sido la primera perforación realizada en la superficie de Marte, con una profundidad de 6 cm, que ha servido para comprobar que Marte no es rojo, sino que debajo de la capa superficial, donde abundan los óxidos de hierro, la tierra se encuentra libre de oxidantes. Esto ha sido un resultado de gran expectación de cara a la futura misión europea *Exomars*, que en 2018 portará un taladro para llegar a los 2 metros en el nivel de subsuelo, y analizar los estratos en un región en que no hay oxidantes y se encuentra libre de la intensa radiación ultravioleta que eliminaría cualquier resto de molécula orgánica.

Curiosity: primera perforación de otro planeta, en la historia: 6 cm. No hay oxidación bajo la fina capa superficial. (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Las que se quedaron en el camino

Entre todas estas misiones, que fueron y están siendo un éxito, hubo otras que fracasaron y algunas de ellas llevaban encomendadas misiones estratégicas insustituibles. Aparte de las rusas Zond–2, *Mars–2 y –3*, dotadas de sondas meteorológicas, ya comentadas, la rusa *Mars–96*, lanzada en 1996 fue una gran pérdida porque llevaba consigo 2 aterrizadores, con sensores atmosféricos y lo más importantes, 2 penetradores, en forma de pértiga, que tenían por objeto introducirse hasta 5 metros y realizar análisis sub-superficie. Imperdonable fue la pérdida de la *Mars Climate Orbiter*, en 1999, debido al uso mezclado de los sistemas de medidas Internacional y Anglosajón. También se perdió, en 1999, la *Mars Polar Lander*, una sonda para el análisis de las regiones polares, y qué decir de la *Beagle-2*, un aterrizador con el que se perdió contacto, cuando se disponía a tomar tierra; *Beagle-2* iba a bordo de la europea *MarsExpress.*

Y más aún, el desastre, otra vez ruso, de la misión *Fobos-Grunt*, perdida en 2011 y que pretendía llegar a Fobos, estudiar su superficie, y retornar muestras de suelo en un módulo de despegue preparado para tal fin. Además *Fobos-Grunt*. En el interior del aparato de 7 kg de peso, que tenía que regresar, se encontraban tres cápsulas con objetos biológicos: microorganismos, larvas de mosquitos, embriones de crustáceos y semillas; los científicos querían explorar cómo soportarían el viaje hacia Marte y de regreso para obtener conclusiones acerca de la teoría de la panspermia.



Zond-2 fue lanzada en secreto el 30 de noviembre de 1964, dos días después del lanzamiento del Mariner 4. Fue una prueba exitosa de motores iónicos, pero sobrevoló Marte a 1500 km sin enviar datos. Llevaba los mismos sensores que las naves Venera que con tanto éxito se posaron en la superficie de Venus. Aquí empezaron los fracasos de la URSS con sus misiones en Marte.

Consideraciones finales

Si hablamos de condiciones de habitabilidad, parece que el lugar adecuado de nuestro Sistema Solar ya se encuentra ocupado por la Tierra. El intenso efecto invernadero en Venus, provocado por una densa atmósfera de dióxido de carbono provoca un forzamiento radiativo del 96%, excesivamente alto comparado con el 36% de la Tierra que le proporciona condiciones de habitabilidad y del 6% de Marte que no permite temperaturas con las que el agua líquida pueda presentarse de forma estable. Esta baja densidad atmosférica también es la responsable de que la temperatura de una roca iluminada por el sol pueda ser de 20ºC y en su sombra -50ºC, de forma que la inercia térmica, necesaria para el mantenimiento de la estabilidad en su superficie, no existe.

En Agosto de 2006 la IAU (*International Astronomical Union*) aprobó la reformulación de la definición de planeta, sacando a Plutón de una lista que todos habíamos aprendido desde niños, generando con ello, una gran crisis de identidad en nuestro Sistema Solar. Parecería que en más de 50 años de carrera espacial aún no hemos clasificado los componentes de nuestro entorno espacial. Esta actualización de nuestros conocimientos en materia planetaria nos hace pensar que los esquemas de búsqueda de vida extraterrestre no están cerrados, ni mucho menos. Tanto es así, que hemos encontrado vida terrestre bajo condiciones, físicas y químicas, impensables hace unos años, como el ejemplo de las aguas ácidas de Riotinto o los microorganismos hallados en las fumarolas volcánicas bajo el océano. Cierto que la superficie marciana está bañada de radiación UV y bajo unos efectos oxidantes "antivida". Sin embargo las posibilidades de poder analizar los estratos subterráneos dota de expectativas la futura misión *Exomars*.

Es muy habitual hablar del futuro de la exploración de Marte haciendo referencia a una misión tripulada. Debe resaltarse que los estímulos científicos no son los mismos que los retos que impone la astronáutica; incluso nos saltamos un paso, que debiera ser la fase intermedia natural entre nuestro estado de exploración y las misiones tripuladas: el de traer muestras marcianas a la Tierra para ser analizadas; ya vimos los objetivos de la misión *Fobos-Grunt*; sin embargo resulta más barato y cómodo instalar el analizador en la propia superficie, salvando así los obstáculos de esterilización y contaminación de las muestras.

El programa *Apollo* en general, y la misión *Apollo-11* en particular representan el paradigma de lo que necesita una misión tripulada para tener éxito y esto debería tenerse en cuenta si ya estamos pensando en misiones tripuladas a Marte. *Apollo* puso de manifiesto la necesidad de tres pilares básicos e indispensables para la consecución con éxito: en primer lugar la estrategia política con la que Kennedy apostó de forma contundente apoyando al programa con una financiación sin precedentes. En segundo lugar la tecnología de cohetes que había adquirido la NASA gracias al equipo de Werner Von Braun quien se había entrenado en Alemania en el desarrollo de las temidas bombas V-2; no olvidemos que la dificultad de una misión tripulada no es sólo salir del campo gravitatorio terrestre sino de volver a salir, con otra nave y en el regreso, del campo gravitatorio lunar. El tercer pilar es la ejecución de la misión; hoy día la programación informática de todas las fases de la misión es la responsable del desarrollo de la misma pero en 1969 los tres astronautas Neil Armstrong, Buz Aldrin y Michael Collins tuvieron que tomar muchas decisiones en tiempo real ante las dificultades técnicas que surgieron a bordo. En todo caso, las misiones *Apollo,* desde la 11 a la 17, desarrolladas entre 1969 y 1972 han pasado a la historia y no se ha vuelto a repetir que otro astronauta pisara otro planeta o la propia Luna. Aún debiéramos añadir el contexto internacional de la guerra fría que propició el avance de los programas espaciales (aunque habría que reflexionar si esta razón es la misma que la de la financiación). Hoy deberíamos repasar si el contexto internacional es el adecuado (o necesario), si la financiación de un programa de misiones tripuladas a Marte está disponible por parte de las agencias (NASA, ESA, JAXA, etc) y, finalmente, si la preparación psicológica humana de la tripulación está probada. Hasta entonces, dispondremos del apoyo de los orbitadores y los rovers, que nos depararán, a buen seguro, datos, sorpresas y expectativas.

Para saber más

PAUL RAEBURN. Marte: descubriendo los secretos del planeta rojo. National Geographic, 1999

GILES SPARROW. Astronáutica. Ediciones Akal/Astronomía, S.A. 2008

http://www.esa.int
http://www.nasa.gov
http://www.iki.rssi.ru/eng/

Mars pathfinder: puesta de sol en Marte.

Vida, Marte y ExoMars

Alejandro Catalá Espí
Unidad Asociada UVa-CSIC a través del Centro de Astrobiología (CAB-INTA)

La vida y su búsqueda fuera de nuestro planeta se ha convertido en un reto científico y tecnológico internacional. Marte es uno de los candidatos a albergar posibles signos de vida pasada o presente, por sus características mineralógicas ligadas a una interesante historia geológica. La Agencia Europea del Espacio (ESA) se suma a esta aventura con un programa de exploración orbital y superficial, ExoMars, con la que pretende contribuir a responder uno de los mayores enigmas de todos los tiempos: ¿Existe vida más allá de la Tierra?

Vida más allá de la Tierra

Desde que la errónea traducción al inglés de los canales de Giovanni Schiaparelli despertara la imaginación popular acerca de vida inteligente en Marte, este planeta ha sido objeto de gran especulación acerca de si la vida tal como la conocemos en la Tierra podría haberse desarrollado fuera de nuestros límites planetarios. Los canales de Schiaparelli terminaron siendo formaciones geológicas y antiguos cauces excavados por algún líquido fluyendo por su superficie y no construcciones de una supuesta civilización alienígena avanzada, tal como numerosas observaciones del planeta han constatado.

Pero la idea de la vida fuera de nuestro hogar no se desvaneció con este golpe de realidad sino que tomó un cariz más científico. Si esos canales fueron excavados por un líquido y ese líquido fuese agua, es posible que Marte hubiese disfrutado de un pasado geológico favorable para el desarrollo de algún tipo de vida.

La cuestión de la vida es una de las más relevantes e inquietantes a las que nos enfrentamos en la actualidad. Innumerables cuestiones surgen en torno a esta idea: ¿es la vida exclusiva de la Tierra? ¿pudo haberse desarrollado en otro planeta, ya no de nuestro Sistema Solar, sino del Universo? ¿tiene la vida un origen común o muchos orígenes? ¿de dónde vienen los ingredientes para la vida? ¿fueron los cometas y planetesimales que dieron lugar a los planetas los portadores de éstos? ¿se construye la vida fuera de la Tierra como la que conocemos en ella? ¿se desarrolló la vida primero en Marte y fue transportada a la Tierra mediante uno de los numerosos meteoritos que aún seguimos recibiendo de este planeta? ¿puede la vida sobrevivir a las condiciones de un viaje por el espacio? ¿cuáles son los límites físicos dentro de los cuales la vida puede desarrollarse? ¿dónde y cómo buscamos los orígenes de la vida? ¿ha borrado la tectónica de placas las huellas de los primeros organismos que poblaron la Tierra hace más de 3000 millones de años? ¿podemos encontrar respuestas en planetas como Marte, que carecen de esta característica geológica? ¿cómo buscamos vida en otro planeta sin contaminarlo con vida terrestre?, y cientos más!

Para tratar de resolver éstas y otras muchas preguntas relacionadas con la vida, su origen, evolución, distribución y supervivencia a lo largo y ancho del Universo, nació la ciencia de la Exobiología o Astrobiología. Esta ciencia de reciente creación (segunda mitad del s.XX) es una ciencia multidisciplinar que abarca desde las ciencias básicas como la física, química y biología, hasta la ingeniería informática y aeroespacial. La era espacial y el desarrollo de misiones de exploración planetaria ha supuesto el trampolín para el despegue y desarrollo de esta ciencia.

¿Vida en Marte?

Marte se ha convertido en foco principal de la búsqueda de vida en nuestro vecindario cósmico debido a que las evidencias geológicas y químicas proporcionadas tanto por los orbitadores como por los aterrizadores y rovers inducen a pensar que el planeta pudo albergar en un pasado las condiciones ambientales que la vida requiere en la Tierra para desarrollarse (agua líquida y temperaturas moderadas). Y no sólo eso, puede que esa vida haya sobrevivido hasta nuestros días bien en estado

Revista de Ciencias, 3, 17-20, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

latente o activo en lugares de la subsuperficie marciana protegidos del ambiente hostil de su superficie.

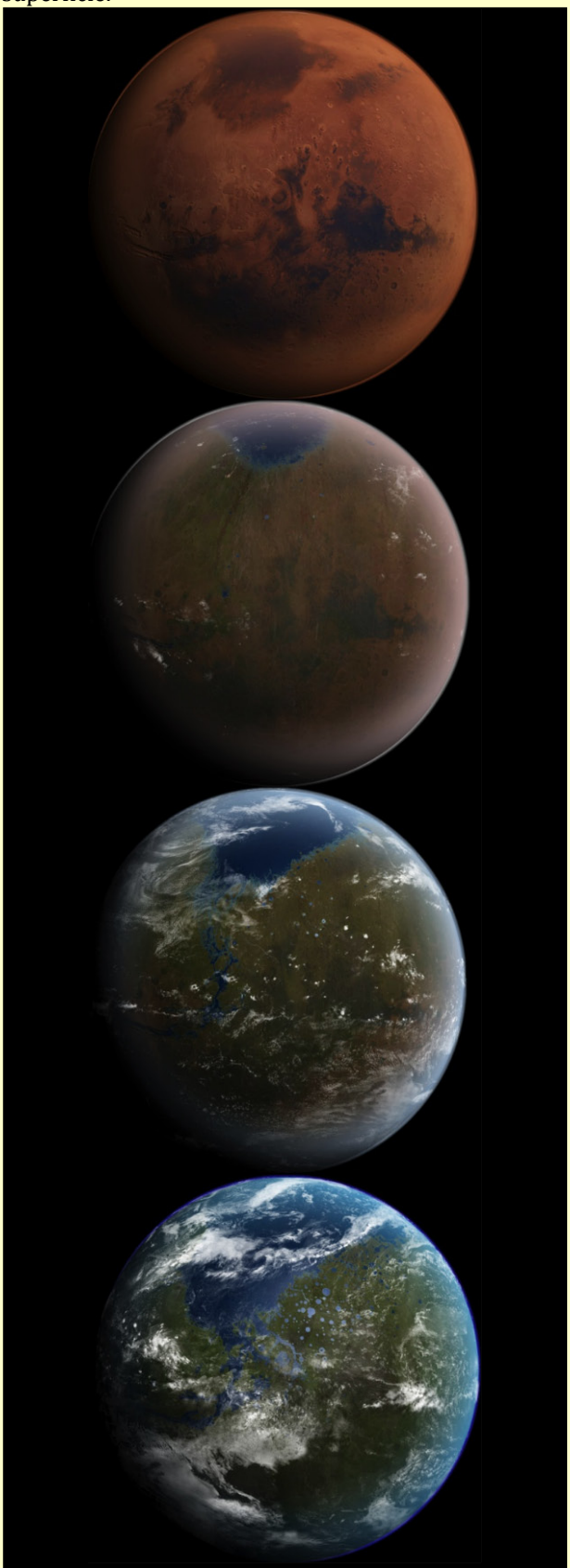


Imagen artística del posible pasado geológico marciano
Adaptado del autor Daein Ballard

Esta hipótesis viene respaldada por datos tanto de la sonda europea *Mars Express* como de potentes espectrómetros colocados en grandes telescopios terrestres, que detectaron la presencia de cantidades variables de metano en la atmósfera de Marte. Aunque otras explicaciones son posibles, el metano es una molécula orgánica que, en la Tierra tiene un origen biológico en el 90% de los casos. Basándonos en nuestro conocimiento actual sobre la atmósfera marciana, la supervivencia de este compuesto bajo la presencia de radiación ultravioleta solar en las condiciones del Marte actual es de 300 a 600 años. Ésta es una vida muy corta a escala geológica pero no tanto a escala biológica.

El descubrimiento de organismos vivos a profundidades de 2 a 3km bajo la superficie terrestre así como el conocimiento de la existencia de una capa de permafrost en la subsuperficie de Marte dan empuje a la hipótesis del origen biótico de estas emisiones de metano marciano. Las dos posibles explicaciones biológicas serían la presente existencia de metanógenos en lugares habitables bajo la superficie del planeta o la liberación de este gas desde profundidades algún día habitadas por microorganismos que, debido a cambios en las condiciones ambientales del planeta se liberan a la atmósfera episódicamente.

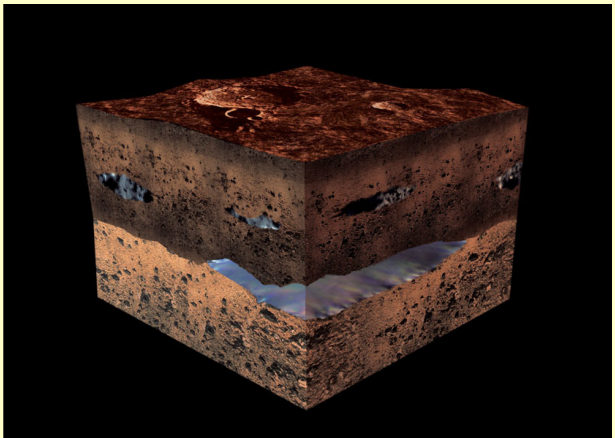
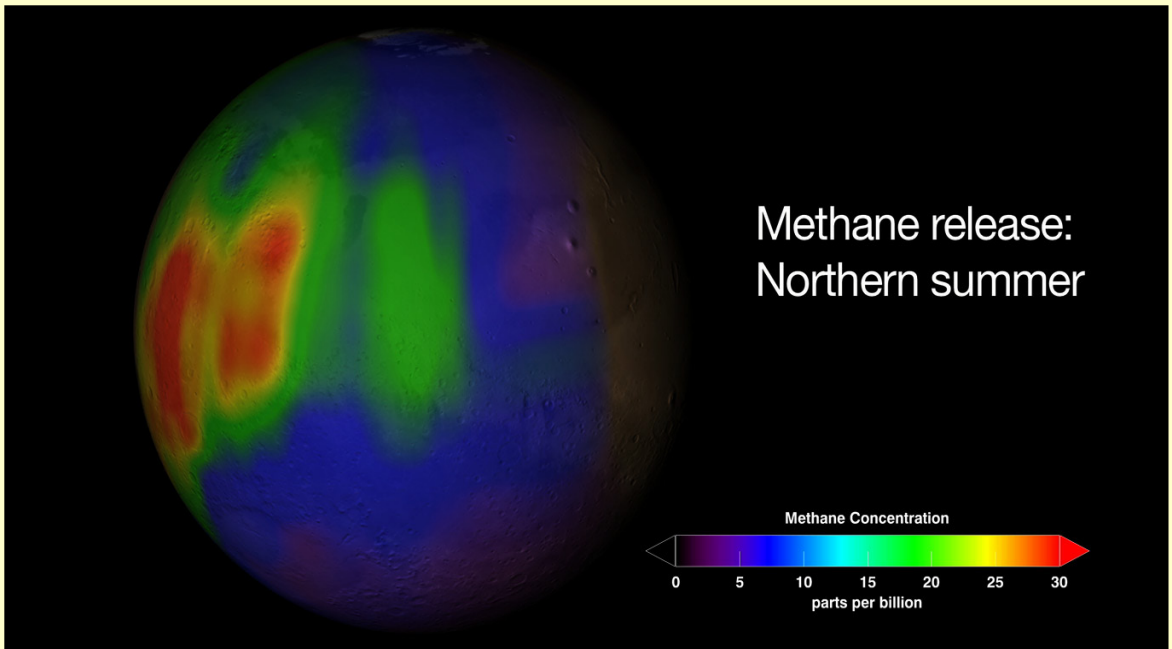


Ilustración volumen de Marte con agua subsuperficial
Credit: ESA 2001, Illustration by Medialab

Por supuesto existen explicaciones abióticas que darían cuenta de esta emisión de metano como la serpentinización del olivino en presencia de dióxido de carbono, ciertos catalizadores y agua líquida. Estas plumas de metano se han descubierto en regiones de Marte que se cree albergaron agua líquida en el pasado del planeta. Conforme las condiciones climáticas cambiaron y el agua migró a la subsuperficie del planeta, estas regiones subsuperficiales pueden ser tanto el foco favorable para la generación hidro-gequímica de metano por serpentinización (si es éste el proceso abiótico que le

da origen) como posibles hábitats para el desarrollo de microorganismos.

La confirmación de este gran descubrimiento es el objeto de las presentes y próximas misiones planetarias. El instrumento SAM del rover *Curiosity* de la NASA no ha encontrado trazas de este gas en su lugar de aterrizaje, *Gale Cráter*. Pero futuras misiones orbitales y robóticas de los ambiciosos programas de exploración de Marte desarrollados por las agencias espaciales internacionales pretenden ahondar y resolver esta cuestión.



Concentración de metano en Marte
Credit: Trent Schindler/NASA

ExoMars

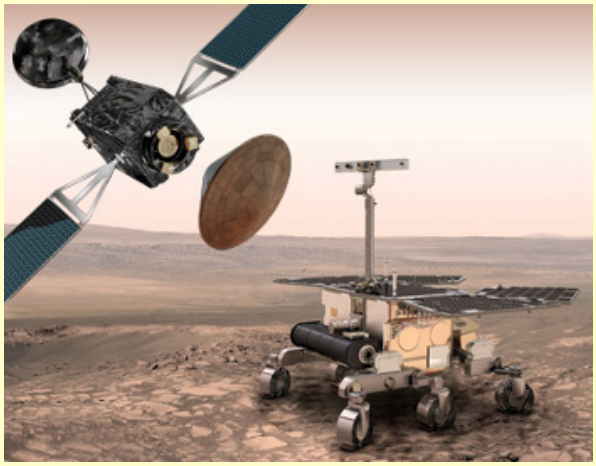
Desde la Agencia Europea del Espacio (ESA) este ambicioso programa de búsqueda de vida pasada o presente en Marte se materializa en la misión *ExoMars*.

El Programa *ExoMars*, que se llevará a cabo en dos etapas, con fechas clave 2016 y 2018, tiene los siguientes objetivos científicos:

- Buscar signos de vida pasada o presente en Marte;
- Investigar cómo el agua y el entorno geoquímico varía; y
- Investigar los gases traza de la atmósfera de Marte y sus fuentes.

La misión de 2016 se compone de un orbitador, el *Trace Gas Orbiter* (TGO), que servirá no sólo de enlace de comunicaciones con la misión de 2018 sino que llevará a cabo la misión científica de estudiar la atmósfera marciana y sus gases minoritarios (en concentraciones inferiores al 1%) que pudieran tener relación con actividades geológicas y biológicas en Marte. De la misma manera, detectará los puntos sobre la superficie en donde estos gases se originan, que pueden ser buenos candidatos como lugares de aterrizaje de las subsecuentes misiones de exploración en superficie. Entre los instrumentos científicos a bordo del orbitador se encuentran varios espectrómetros con rango de visión desde el infrarrojo al ultravioleta, cámaras de ultra-alta resolución para tomar imágenes estéreo en color de la superficie del planeta con resoluciones de hasta 5m/pixel y un detector de neutrones que ayudará a localizar depósitos de agua helada en la subsuperficie de Marte.

Esta misión también incorpora un módulo de demostración de las etapas de Entrada, Descenso y Aterrizaje (EDM) que probará las tecnologías necesarias para aterrizar cargas científicas en la superficie de Marte: escudo térmico, paracaídas supersónico y retropropulsores. Este módulo analizará parámetros físicos durante el proceso de descenso y portará instrumentación científica que posará sobre la superficie de Marte para estudiar durante un corto periodo de tiempo (entre 2 y 8 días) el entorno en el lugar de aterrizaje.

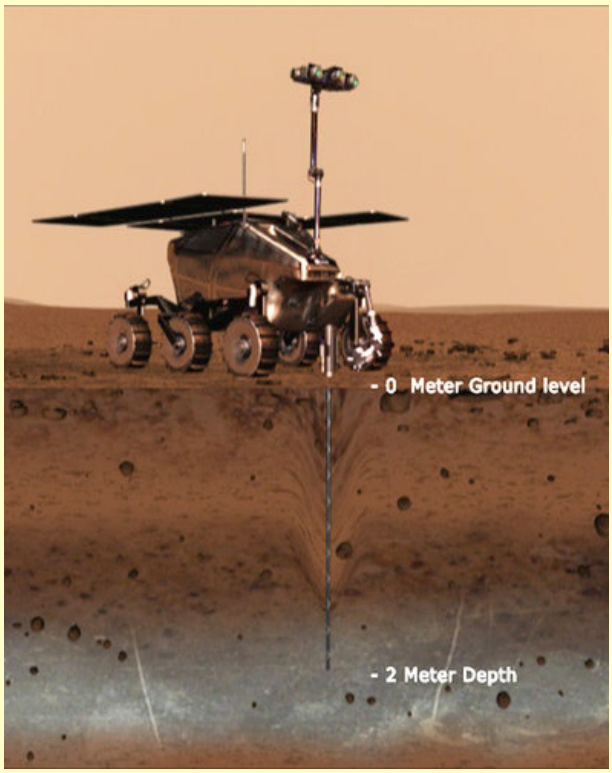


ExoMars Programme 2016-2018
Credit: ESA

La misión de 2018, el rover *ExoMars*, portará un taladro e instrumentos para el análisis geoquímico y exobiológico de muestras del suelo y subsuelo marciano. Por primera vez en la exploración de un planeta vecino se explorará la dimensión de profundidad, permitiendo el acceso a lugares protegidos de la alta radiación solar y de partículas que irradia la superficie del planeta, así como de productos oxidantes que aniquilaría cualquier traza de vida pasada o presente existente.

El set de instrumentos del rover de *ExoMars* permite: (1) hacer un estudio exhaustivo del entorno geológico superficial desde la escala del metro mediante cámaras panorámicas y espectrómetros para crear mapas digitales del terreno y obtener información mineralógica del mismo, respectivamente y con ello seleccionar las potenciales muestras de interés, hasta la del milímetro con cámaras de aproximación de alta resolución a color para tomar imágenes a rocas y muestras extraídas con el taladro; (2) caracterizar geoquímicamente el subsuelo marciano nuevamente desde la escala del metro con un radar de penetración, hasta la escala del milímetro con una cámara multiespectral integrada en el taladro que mapeará la subsuperficie conforme éste penetre en Marte; (3) analizar la composición geoquímica de los testigos extraídos del subsuelo marciano en las perforaciones verticales mediante el uso de tres instrumentos en el interior del rover.

Estos tres instrumentos y el sistema de preparación de las muestras que se les presentarán merecen una mención aparte. En el interior del rover *ExoMars* se aloja un laboratorio analítico con un Sistema de Preparación y Distribución de Muestras (SPDS) que convertirá en polvo los testigos de 1cm de diámetro por 3 cm de longitud y lo depositará en varias dosis sobre un contenedor de muestras cuyo contenido, una vez aplanado, se presentará a los instrumentos científicos que lo analizarán. Estos tres instrumentos de análisis de las muestras en polvo constan de: (1) una cámara multiespectral visible + infrarroja para el estudio mineralógico de las muestras, (2) un espectrómetro Raman para establecer su composición mineralógica y química, y (3) un analizador molecular para detectar moléculas orgánicas y biomarcadores.



ExoMars taladrando Marte
Copyright: ESA - AOES Medialab

Mención especial hay que hacerle al *Raman Laser Spectrometer* (RLS). Este instrumento está desarrollándose en gran parte en España, en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Y la Unidad Asociada UVa-CSIC, sita en el Parque Tecnológico de Boecillo se encarga de desarrollar la ciencia de soporte al instrumento, bajo la dirección del Dr. Fernando Rull, Investigador Principal de este instrumento de *ExoMars*.

Para saber más

http://exploration.esa.int/mars/
http://tierra.rediris.es/erica/

La percepción acústica: Tono y timbre

Jesús Mariano Merino y Loida Muñoz-Repiso
Dpto.de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valladolid

En la audición intervienen el oído y el cerebro, el primero convierte las ondas acústicas en impulsos nerviosos y el segundo detrae de estos últimos la sensación acústica. El oído se comporta como un sofisticado analizador de sonidos y responde a las leyes de la Física, cosa que no sucede con la actividad del cerebro, la cual no se ajusta en absoluto a esas leyes. Más aún, se desconocen los mecanismos por los que el cerebro obtiene las sensaciones acústicas a partir de los impulsos que le llegan por los nervios auditivos. Tan solo se han establecido ciertos principios psicológicos que pretenden esclarecer la generación de las sensaciones auditivas. Por ello, los conceptos de tono y timbre se presentan generalmente de forma muy simplista, ofreciendo de ellos una visión excesivamente caricaturizada y notablemente alejada de la realidad. Este artículo ofrece una descripción realista de las sensaciones de tono y timbre incorporando los más modernos avances en la psicología de la audición.
Las exposiciones se complementan con demostraciones audiovisuales a las que el lector puede acceder siguiendo los vínculos que aparecen en el texto.

Percepción del tono

Existen dos teorías que explican cómo y porqué percibimos el tono o altura de los sonidos. Una de ellas, conocida como *Teoría de la periodicidad* propone que cuando el complejo psicoacústico (oído y cerebro) recibe con regularidad una sucesión de pulsos acústicos, detrae de ellos una sensación de tono cuya frecuencia se corresponde con la frecuencia con que se suceden los estímulos.

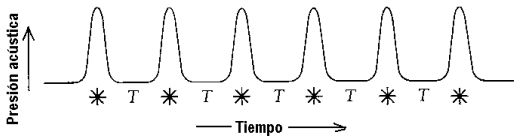


Figura 1 La sucesión periódica de pulsos origina sensación de tono.

Desde este punto de vista, parece evidente que la creación de la sensación de sonido corre a cargo del cerebro con exclusividad. En este caso, el oído se limita a ser un mero captador de impulsos, sin intervenir en el análisis de la naturaleza y composición espectral de cada pulso. En estos hechos se fundamenta el funcionamiento de la sirena de vapor.

La otra explicación, conocida como *Teoría de la Localización* es la elaborada por G.V. Békésy, la cual ha sido expuesta en un artículo precedente (ver el nº 2 de esta revista). Esta teoría permite explicar además la sensación de timbre, por lo que resulta más completa. No obstante, hay razones prácticas que avalan la veracidad de una y otra, de forma que lo más acertado es aceptar que los mecanismos de percepción acústica disponen de una y otra formas de actuación. Por otro lado, la percepción del tono está influenciada por otros factores.

Demostración 1: *Comprobación de la Teoría de la Periodicidad*

Influencia de la duración del estímulo en la percepción del tono.

La Teoría de la periodicidad, propugna que el cerebro "cuenta" el número de pulsos recibidos por segundo, según se expresa en la figura 1. Pero para hacer la estimación del tono, el cerebro necesita un número mínimo de "muestras". Teóricamente, con

Revista de Ciencias, 3, 21-32, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

sólo dos de ellas es posible medir el período con que se suceden pero este es un procedimiento matemático que nada tiene que ver con los mecanismos psíquicos.

La "Teoría de la Periodicidad puede ser resumida en la expresión:

$$(\Delta f).(\Delta t) \geq k$$

Esta expresión recuerda formalmente a la del Principio de Incertidumbre de Heissenberg, uno de los pilares de la Física Cuántica. Por esta razón también se la conoce como "Ley de la Incertidumbre Acústica". En ella se expresa que el producto de la frecuencia f de un sonido tonal por el tiempo de su duración t no puede ser menor que una cierta cantidad, si se quiere percibir sensación tonal. Dicho producto es obviamente un número determinado de pulsos de onda, precisamente, es el número mínimo de pulsos que necesita el cerebro para identificar de qué frecuencia se trata, es decir, la altura del tono.

Experimentalmente puede comprobarse que la percepción de tonos agudos requiere tiempos de estimulación más breves que en el caso de los tonos graves, lo cual resulta lógico toda vez que en los sonidos agudos los pulsos se suceden más rápidamente que en los graves. En efecto, si se presentan series de tonos puros de 300, 1000 y 3000 Hz en pulsos de duración creciente, de 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 períodos puede comprobarse que al principio sólo se percibe un *clic* sin sensación tonal, la cual aparece más tarde. El número de pulsos mínimo para obtener sensación tonal varía ligeramente de unos individuos a otros.

Demostración 2: *Dependencia temporal de la percepción del tono*

Influencia de la intensidad del estímulo en la percepción del tono

Muchos individuos experimentan alteraciones de hasta el 10 % en la percepción del tono de los sonidos a causa del nivel de intensidad de los mismos. En general, un aumento de la intensidad tiende a elevar el tono percibido en los sonidos agudos y a bajarlo en los graves. Para comprobar este efecto puede realizarse el siguiente experimento: Primeramente es preciso presentar al oído un tono puro de 200 Hz. Y se ha de ajustar el nivel de volumen del equipo reproductor hasta que el nivel de ese tono coincida con el umbral de audición, es decir, que apenas se oiga. Seguidamente se presentan al oído seis pares de tonos puros de 0,5 s de duración con frecuencias de 200, 500, 1000, 3000 y 4000 Hz. En cada pareja, el primer estímulo tiene un nivel de intensidad constante y el segundo lo tiene aumentado en 30 db. Se puede comprobar entonces que en frecuencias bajas el tono parece bajar y en las altas parece subir.

Influencia del ruido enmascarador

La estimulación de la membrana basilar es acampanada, según muestra la figura 2, existiendo un punto de máxima excitación. Así pues, el cerebro identifica el pico de máxima excitación, extrayendo de este modo la sensación puntual de tono, según preconiza la Teoría de la Localización.

Puede comprobarse experimentalmente que si se presentan alternativamente, un tono puro de 1000 Hz (fig. 2-a) y ese mismo tono parcialmente enmascarado por un ruido de banda ancha de hasta 900 Hz. (fig. 2-b) puede apreciarse que cuando se oye el tono parcialmente enmascarado por el ruido, el primero parece elevarse.

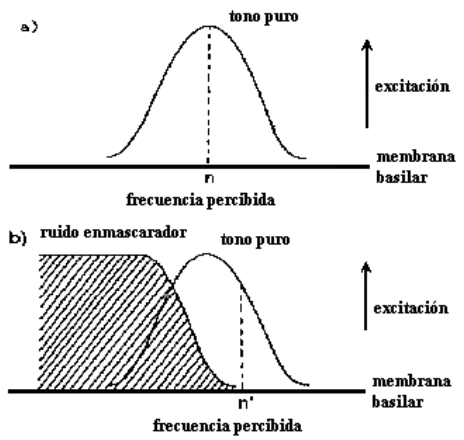


Figura 2 Efecto del ruido enmascarador en la percepción del tono. La zona basilar afectada por el ruido fuerza al cerebro a identificar el punto de máxima excitación tonal por encima del que realmente es.

Demostración 3: *Influencia del ruido enmascarador en el tono*

Percepción del timbre

La Teoría de la Localización explica que la percepción del timbre tiene lugar merced a complejos mecanismos que el cerebro realiza a partir de los estímulos procedentes de las neuronas afectadas en el órgano de Corti por los diferentes armónicos de un sonido complejo.

Demostración 4: *Audición de armónicos en un sonido complejo.*

Ahora bien, la cosa es aún más compleja ya que el reconocimiento que hacemos de la voz de un individuo o de un instrumento musical se

fundamenta no solo en la composición espectral del sonido sino también de la evolución temporal de ese espectro desde su emisión hasta su extinción y también de la envolvente de la intensidad. Realmente, el oído humano se comporta como un eficientísimo analizador de sonidos, fruto del desarrollo evolutivo de nuestra especie, que "apostó" por una organización social compleja dejando en un segundo término otros medios de supervivencia propios de las demás especies zoológicas.

Demostración 5: *El tono de las campanas.*

Demostración 6: *Efecto del espectro en el timbre.*

Efecto de la envolvente de intensidad en el timbre

Todo sonido tiene una evolución temporal de la intensidad que puede ser esquematizada según muestra la figura 3. Esta empieza con un inicio en el que la intensidad sube del valor cero hasta una cierta intensidad inicial, esta intensidad se mantiene un cierto tiempo para, finalmente, extinguirse. Resulta que la forma de esta evolución temporal de la intensidad es, además de la composición espectral, otro sello de identidad del timbre.

Los instrumentos musicales de madera tienen ataques más suaves y prolongados que los instrumentos de cuerda pulsada. Pues bien, si mediante un sintetizador de sonido se presenta una misma melodía de tonos complejos, primeramente con una envolvente simétrica (con ataque suave y decaimiento corto) y en segundo lugar con envolvente asimétrica (con ataque violento y decaimiento prolongado), el timbre que percibiremos parece evolucionar de un instrumento de madera a otro de cuerda pulsada.

Otra forma más espectacular de demostrar este efecto consiste en lo siguiente: Con ayuda de un ordenador equipado con software de edición de sonido, se obtiene un archivo de audio (a) a partir de la interpretación por un piano de una partitura conocida. En segundo lugar, ese mismo piano ha de interpretar la misma partitura, en sentido inverso (es decir, como si la partitura estuviera escrita en una lámina de vidrio y esta se hubiera leído por su cara posterior), a partir de lo cual obtendremos el archivo de audio (b).

A continuación escucharemos primero el archivo (a), en el cual reconoceremos la melodía con la voz del piano. Luego escucharemos el archivo (b) el cual será una sucesión ininteligible de notas en el que no reconoceremos la melodía aunque, eso sí, reconoceremos la voz del piano y también la armonía vertical. Finalmente, al reproducir el archivo (b) en sentido inverso reconoceremos de nuevo la melodía y la armonía vertical pero ¡el piano no suena como piano, sino como un armonio de iglesia!

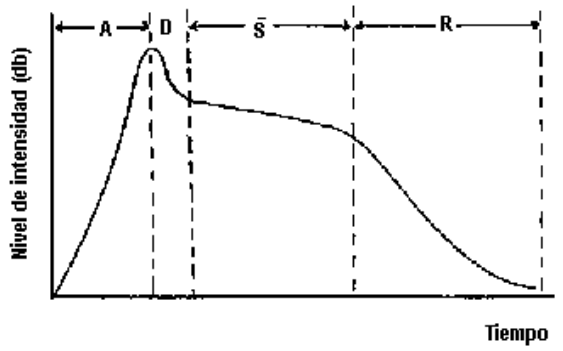


Figura 3 Estructura de la envolvente de intensidad de un sonido desde su emisión hasta su extinción. **A** Ataque; **D** Decaimiento inicial; **S** Sustentación; **R** Relajación.

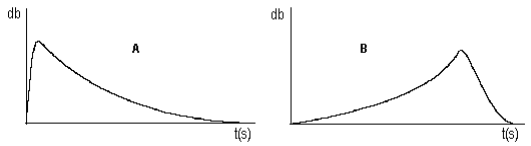


Figura 4 Instrumentos como el piano se caracterizan por el ataque abrupto de sus sonidos seguidos de un largo *soustain* (A). Por el contrario, instrumentos como el armonio tienen sonidos con un ataque suave (B).

Demostración 7: *Efecto de la envolvente temporal en el timbre.*

La percepción del timbre y la memoria

El cerebro tiene almacenados en la memoria una ingente cantidad de registros de timbres, de forma que cuando se oye un sonido se activan los mecanismos psíquicos de reconocimiento, entre los cuales figura la memoria como elemento primordial. Como comprobación de todo ello, puede hacerse el siguiente experimento: En primer lugar es preciso escuchar la voz de un instrumento musical, por ejemplo, fagot que recorre su tesitura de tres octavas. A continuación oiremos esas tres octavas con sonidos sintéticos, para los cuales se ha tomado como modelo la nota más aguda del fagot. Todas las notas reproducen exactamente la misma composición espectral. Tendremos verdaderas dificultades para reconocer al fagot en la segunda audición, las cuales no encontramos en la primera.

Demostración 8: *Diversidad del timbre en los instrumentos musicales.*

Ello se debe a que la composición espectral de los sonidos emitidos por los instrumentos musicales varía a lo largo de su tesitura. Generalmente asumimos que el timbre de un instrumento que interpreta una escala, es el mismo en todas las notas, y que lo único que varía es la frecuencia fundamental y las de sus armónicos superiores. Sin embargo esto no es así, en realidad, cada nota de un mismo instrumento tiene su propio timbre, distinto al de las restantes. Todas estas variaciones se hallan almacenadas en la memoria y, cuando lo que oímos no concuerda con nuestros datos almacenados, el reconocimiento del sonido da resultados negativos.

Enmascaramiento

Cuando un punto de la membrana basilar es afectado por dos sonidos, se dice que hay enmascaramiento. Generalmente, los tonos graves enmascaran más a los agudos que los agudos a los graves. Ello se debe a la forma en que excitan la membrana basilar y también a la zona de la membrana que unos y otros afectan. Es un hecho comprobado que un sonido intenso de altura grave puede enmascarar un sonido débil de altura aguda, pero nunca al contrario.

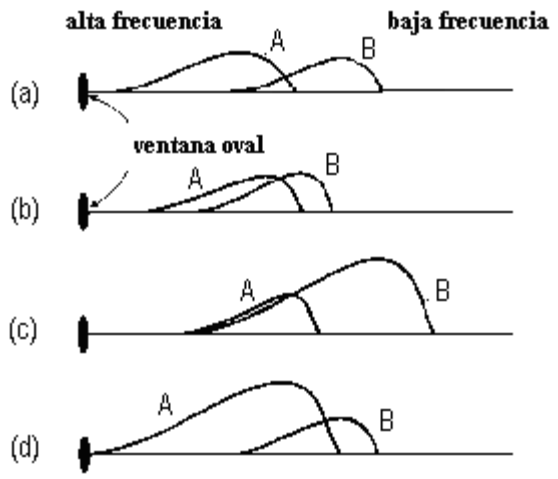


Figura 5 Respuesta de la membrana basilar a distintas frecuencias. Cuando dos tonos A y B coinciden, puede haber enmascaramiento si ambas frecuencias son parecidas. Ahora bien, las frecuencias bajas (B) enmascaran más eficazmente a las altas (A) que al revés, debido a la forma en que la membrana basilar es excitada.

Esto se comprende a la vista de lo expuesto sobre la estructura y funcionamiento del oído interno; puesto que si el punto de máxima excitación de la membrana basilar para tonos de baja frecuencia está en el extremo apical de la cóclea, mientras que para tonos de alta frecuencia se sitúa en su extremo basal, la onda excitada por un tono de alta frecuencia nunca alcanzará el punto de máxima excitación de un tono de baja frecuencia. Por el contrario, para llegar a su punto receptor, las ondas producidas por tonos de baja frecuencia han de pasar forzosamente por los puntos receptores de los tonos de frecuencias superiores. Cabe esperar que la excitación de la membrana basilar en estos puntos pueda interferir con la percepción de tonos de alta frecuencia, esto es precisamente lo que sucede si el tono de baja frecuencia es lo suficientemente intenso.

Demostración 9: *Influencia de la frecuencia en el enmascaramiento.*

Es cierto que para la mayoría de frecuencias y niveles de intensidad, un ruido de banda ancha (que contiene casi todas las frecuencias) enmascara con mayor eficacia que un tono puro de la misma intensidad. Ahora bien, esto carece prácticamente de interés en Música, ya que en este caso lo verdaderamente importante es el enmascaramiento por otros sonidos. Para que este último tipo de enmascaramiento sea eficaz, la intensidad del tono enmascarador ha de estar unos 15 db por encima del tono enmascarado. La situación real en el caso de los sonidos musicales es que estos nunca son tonos puros, sino que tienen una frecuencia fundamental (real o virtual) y armónicos superiores cuya intensidad puede ser muy superior a la de la frecuencia fundamental. Con frecuencia, los casos de enmascaramiento corren de cuenta de esos armónicos superiores.

Demostración 10: *Análisis de un sonido de banda ancha.*

La afectación de la membrana basilar por los estímulos acústicos dura un breve tiempo, después que el estímulo ha cesado. Por este motivo puede haber enmascaramiento entre dos sonidos no simultáneos, pero temporalmente muy próximos.

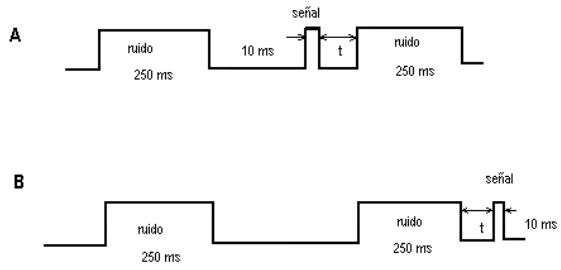


Figura 6 Enmascaramiento de sonidos no simultáneos

La figura 6 muestra el enmascaramiento de un tono puro por ruido de banda estrecha, ambos no simultáneos. Si el tiempo *t* que separa el ruido enmascarador del tono enmascarado se hace menor

que 0,1 s se aprecia una pérdida en la percepción del tono que se hace más pronunciada a medida que *t* se reduce. Este enmascaramiento se da, lo mismo si el tono precede al ruido que si el ruido precede al tono.

También el enmascaramiento entre sonidos no simultáneos puede perturbar la percepción de una secuencia de sonidos. Así, si escucháramos una serie de tonos puros de 2000 Hz cuyo nivel decrece en –1 db por cada cuatro pulsos, separados todos ellos 0,125 s, percibiríamos todos ellos sin grandes dificultades. Pues bien, si ahora entre pulso y pulso se intercala un ruido enmascarador de nivel constante y 0,125 s de duración, se puede comprobar que el cerebro resulta engañado por el enmascaramiento y llega un punto en el que los pulsos se confunden, dando sensación de continuidad (fig. 7).

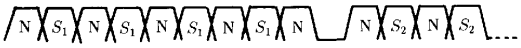


Figura 7 Los tonos puros S decrementan su nivel de intensidad en –1 db (S_1, S_2, S_3, ...) y alternan con ruidos N de nivel constante. Llegando a un valor de S suficientemente bajo, se tiene la sensación de que la señal suena de forma constante, y no discontinuamente

Finalmente, diremos que el enmascaramiento puede afectar a la percepción de tonos virtuales procedentes de armónicos superiores si el ruido enmascarador actúa sobre la región de la membrana basilar en la que esos armónicos son detectados. Este es un asunto que se verá más adelante.

La audición binaural

El pabellón de la oreja actúa como un captador direccional, así, cuando un foco emite ondas sonoras, nuestros oídos son excitados con diferente intensidad según sea la posición del foco respecto de nosotros[2]. El cerebro puede tomar conciencia de la posición del foco sonoro en virtud de la desigual estimulación de uno y otro oído.

Cuando un foco acústico no está en frente del oyente, los recorridos de la onda acústica que llega a uno y otro oído son distintos, sucediendo que el mismo estímulo llega antes a un oído que al otro y, en consecuencia, la fase de las vibraciones difiere en ambos oídos. Además, dado el carácter direccional de la oreja como elemento captador, la intensidad que recibe un oído es superior a la que recibe el otro.

[2] En muchas especies animales las orejas son móviles, como es el caso de caballos, conejos, cérvidos, etc. y en el caso de los simios, incluida la especie humana, la función de captación direccional se lleva a efecto mediante la movilidad de la cabeza.

Estas tres diferencias son captadas y procesadas por el cerebro, lo cual le permite identificar la situación del foco acústico.

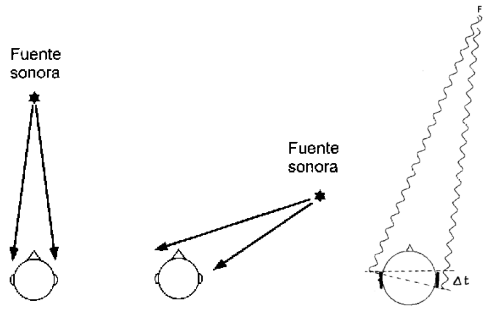


Figura 8 Localización binaural de un foco sonoro. Si las señales acústicas en ambos oídos son idénticas, el cerebro localiza la fuente en frente del observador (a). Por el contrario, la localización lateral del foco es tanto más acusada cuanto más dispares sean las señales en uno y otro oídos (b). En estas condiciones, un oído oye con más intensidad que el otro, ambos oídos reciben la misma señal a destiempo Δt y la señal que llega al mismo tiempo a ambos oídos presenta un desfase (en la figura, ¾ λ) (c)

Demostración 11: *Lateralización binaural*

El sencillo experimento esquematizado en la figura 9 resulta muy ilustrativo y convincente: Se trata de un aparato que reproduce el sonido constante del motor acelerado de un automóvil. La señal de esta grabación es dividida mediante el divisor de tensión T y cada uno de los "fragmentos" de la señal es enviada a uno de los auriculares de un casco estereofónico. Al desplazar de izquierda a derecha el mando de T, tendremos la impresión de que un vehículo pasa por delante de nosotros, de izquierda a derecha, debido a que las intensidades con que los auriculares excitan nuestros oídos siguen la misma pauta que en el caso de que el vehículo pasase realmente por delante de nosotros.

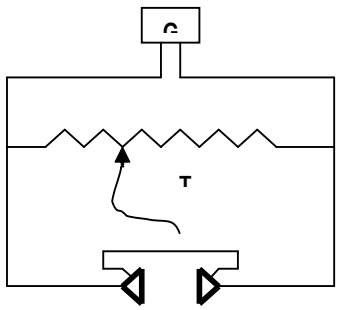


Figura 9

Cuando un espectador sentado en el centro del patio de butacas escucha el concierto de una orquesta, sus oídos están en todo momento excitados de forma desigual. La orquesta es ciertamente un foco sonoro

extenso, pero por su disposición habitual, predominan los sonidos agudos procedentes de violines y flautas en el lado izquierdo, mientras que en el derecho abundan los sonidos graves de violoncelos, contrabajos, trombones y tubas. Esto motiva que las sensaciones obtenidas por uno y otro oídos al escuchar, en un momento dado, un *tutti* orquestal son distintas, pudiéndose localizar tan sólo con ayuda de los oídos las posiciones de los distintos grupos de instrumentos, lo que le da al sonido percibido todo su relieve y color.

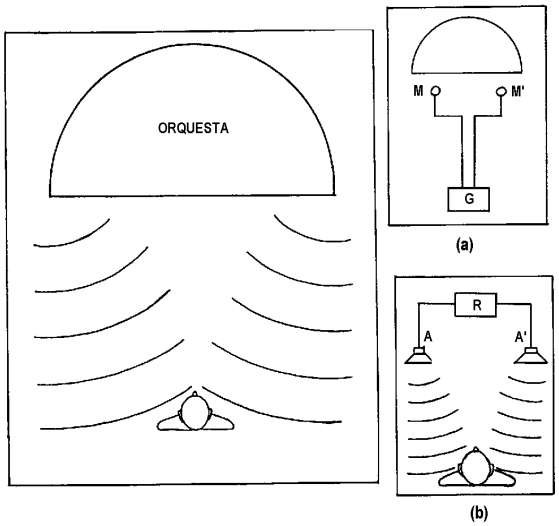


Figura 10 Diferencias entre la audición "en vivo" y en reproducción convencional. Al grabar el sonido de la orquesta mediante los micrófonos M y M' se recoge el sonido más próximo a cada uno (a). Al reproducir ambas pistas, el sonido resultante se asemeja al que se escucharía "en vivo" si entre el espectador y la orquesta hubiera una pared en la que se hubieran practicado dos ventanas en posiciones equivalentes a los micrófonos (b). Este sonido se asemeja, pero no es igual, al escuchado "en vivo" (arriba).

Precisamente por este motivo, los sistemas de grabación y reproducción estereofónicos convencionales se basan en la obtención de dos grabaciones simultáneas, obtenidas mediante dos micrófonos convenientemente separados que luego son reproducidas por los altavoces, dispuestos en la forma que se indica en la figura 10-a. El oyente tiene así una sensación sonora, si no igual, análoga a la del que escucha a la orquesta en vivo. Si las grabaciones que escucha el oyente de la figura 10-b procediesen de una misma fuente monoaural, sus oídos percibirían la misma sensación, con lo que se perdería el relieve estereofónico.

A la vista de todo lo anteriormente expuesto, se explica también el efecto producido por un órgano en una catedral. En este tipo de recintos, el sonido se refleja innumerables veces, de forma que los oídos perciben no sólo el sonido directo, sino también sus numerosas reflexiones, lo que impide la localización auditiva del foco sonoro, dando la sensación de que lo llena todo. Quizá por ello, el órgano es el instrumento religioso por antonomasia. La audición binaural constituye además un recurso estimable a la hora de discernir sonidos en ambientes ruidosos posibilitando la audición de sonidos que, de otro modo, estarían totalmente enmascarados.

Demostración 12: *Diferencias de nivel de enmascaramiento.*

Otros fenómenos auditivos

Sin duda, la audición humana es una función tan necesaria como compleja que a lo largo de miles de generaciones ha desarrollado nuestra especie por evolución natural. Y ha tenido que ser así en el caso de un ser pensante eminentemente social. Consideremos que, para sobrevivir, al *homo sapiens* no le era suficiente el disponer de un finísimo oído capaz de detectar cuanto antes al depredador sino, más bien, lo importante era reconocer por la voz a los distintos individuos del clan e intercambiar ideas y emociones por medio del habla, y para ello era necesario un sistema psicoacústico enormemente desarrollado, capaz sobre todo de percibir los timbres con precisión y eficacia. El gran desarrollo del complejo psicoacústico en nuestra especie ha dado lugar a un alto grado de sofisticación en los mecanismos cerebrales de la audición, algunos de los cuales veremos a continuación.

Tono virtual

Cuando oímos un concierto interpretado por una orquesta sinfónica escuchamos desde las frecuencias muy graves emitidas por contrabajos y tubas hasta los más agudos emitidos por los violines y el piccolo, pasando por todos los tonos intermedios emitidos por los diferentes instrumentos. El conjunto de todos los sonidos y su secuenciación constituyen el cuerpo acústico de la sinfonía o concierto interpretados. Así, cuando escuchamos una obra que en todo o en parte hemos memorizado con anterioridad, se ponen en marcha los mecanismos psicoacústicos de reconocimiento que nos permiten identificar la obra ya conocida.

Por otro lado, con frecuencia escuchamos música en reproductores que, por su pequeño tamaño o su baja potencia, no son capaces de reproducir las frecuencias graves. Tal sucede, por ejemplo, cuando paseamos por un parque mientras escuchamos un programa musical mediante una pequeña radio de pilas. Supongamos que en ese programa se está emitiendo algo tan conocido como la "Oda a la alegría" de la Sinfonía nº 9 de L.V. Beethoven. Ciertamente, los sonidos que reproduce nuestro pequeño aparato no son iguales que el sonido que

emiten la orquesta y el coro en la interpretación en vivo de tan majestuosa partitura. Sin embargo nuestro cerebro reconoce la obra que tan familiar nos resulta pese a no estar oyendo buena parte de los sonidos que realmente la conforman. En nuestro caso faltan los sonidos graves y, sin embargo, reconocemos la obra, e incluso disfrutamos de la audición.

¿Qué está pasando? Pues, ciertamente, algo extraordinario y al propio tiempo fascinante: nuestro cerebro, con una velocidad y eficiencia enormes, está recomponiendo el sonido incompleto (falto de frecuencias graves) y generando sensaciones virtuales de tonos graves no reproducidos que, junto a los más agudos, reales, proporcionan la impresión de estar escuchando lo que realmente no escuchamos. A este mecanismo psicoacústico, de gran importancia en la Música, se le denomina *percepción del tono virtual.*

Cuando oímos un sonido complejo, detraemos la sensación de altura de la frecuencia fundamental, mientras que los restantes armónicos contribuyen a la sensación del timbre. Ahora bien, nuestro sistema psicoacústico está diseñado de forma tal que cuando falta la frecuencia fundamental seguimos teniendo la misma sensación y, aún más, si faltan los armónicos segundo, tercero, etc., la sensación de tono persiste. A esta sensación se le llama *tono virtual*.
La percepción del tono virtual puede comprobarse si, por medio de un sintetizador, se presenta al oído un tono complejo formado por el fundamental y los nueve armónicos siguientes. Si en sucesivas audiciones se van eliminando, primero el fundamental, luego este y el segundo armónico, luego los tres primeros, y así sucesivamente, puede comprobarse que la sensación tonal no varía (aunque sí el timbre) y corresponde en todo momento a la frecuencia fundamental aunque esta no esté presente.

Demostración 13: *Tono virtual.*

Matemáticamente, la frecuencia fundamental es el máximo común divisor de las frecuencias superiores (o, si se prefiere, las frecuencias superiores son múltiplos enteros de la fundamental). Así pues, lo que hace el cerebro con pasmosa eficacia cuando escuchamos un sonido complejo es identificar todas y cada una de las frecuencias que lo componen y luego detrae la sensación tonal del máximo común divisor de todas ellas, esté o no presente en el espectro (Fig. 11). Son posibles diversos experimentos que ponen de manifiesto la extraordinaria destreza del cerebro en la percepción de tonos virtuales.

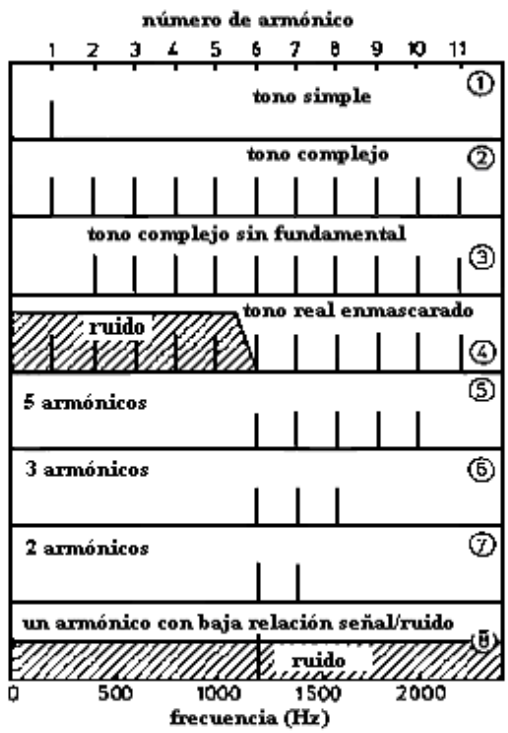


Figura 11 Ocho sonidos diferentes que presentan un mismo tono. En los casos 1 y 2 el tono percibido es real y en los restantes casos es virtual.

Demostración 14: *Tono virtual y armónicos aleatorios.*

Uno de ellos consiste en presentar al oído un tono complejo formado por tres de sus armónicos superiores. Luego, a lo largo de diez pasos, esos armónicos verán progresivamente incrementada su frecuencia, de forma que las diferencias entre ellas se mantengan constantes. Automáticamente, el cerebro proporciona un tono virtual que se va elevando.

Demostración 15: *Desplazamiento del tono virtual.*

Otra demostración consiste en presentar una terna de armónicos de 800, 1000 y 1200 Hz seguida de otra de 850, 1050 y 1250 Hz. Apreciaremos claramente que el tono virtual se eleva. El tono virtual percibido pasa de 200 Hz a 210 Hz. Si en el primer caso el cerebro encontró el m.c.d. sin dificultades, en el segundo se ha visto forzado a promediar un m.c.d.

Demostración 16: *Desplazamiento del tono virtual.*

En conclusión, el cerebro detrae la sensación de tono virtual mediante un mecanismo de obtención del m.c.d. de las frecuencias de los armónicos superiores realmente percibidas. Esta operación computacional del cerebro queda perfectamente ilustrada en la siguiente demostración.

Demostración 17: *Enmascaramiento espectral y tono virtual.*

Tonos de combinación

Se dice que un resonador tiene comportamiento lineal cuando la fuerza necesaria para obtener desplazamientos es proporcional a los desplazamientos obtenidos. Así, si se aplicase un movimiento armónico simple a un sistema resonante de respuesta lineal, el movimiento producido sería también armónico simple. Cuando la respuesta dada por un resonador no es lineal, se dice que hay *distorsión*, habiendo distorsión de frecuencia o de amplitud según que el resonador responda de forma no lineal a la frecuencia o a la amplitud. También puede haber una distorsión de fase cuando las fases de los componentes de una vibración compleja no son conservadas en la respuesta.

Cuando sobre un sistema distorsionante, como lo es el oído, inciden dos tonos puros de frecuencias f_1 y f_2 se producen sonidos armónicos $2f_1$, $2f_2$, $3f_1$, $3f_2$, ... y una serie de sonidos de frecuencias f_1+f_2; f_1-f_2; $2f_1+f_2$; $2f_1-f_2$; ... , llamados *tonos de combinación*. Como vemos, cabe distinguir entre tonos de combinación adicionales (descubiertos por H.V. Helmholtz) y diferenciales, descubiertos simultáneamente por G.A. Sorge[3] y G. Tartini[4]. Estos últimos son los tonos de combinación de mayor importancia. Normalmente, cuando escuchamos simultáneamente dos tonos de frecuencias f_1 y f_2 se produce una sensación tonal de frecuencia grave (f_1-f_2) y también otra de frecuencia aguda $(2f_1-f_2)$. Este fenómeno psicoacústico tiene en parte una causa física en la no linealidad de respuesta del oído ante las frecuencias y amplitudes de las ondas acústicas que a él llegan.

La presencia de los llamados *tonos de Tartini* puede ponerse de manifiesto de varias maneras. Una de ellas es presentar, por ejemplo, dos tonos puros simultáneos de 1000 y 1200 Hz. que producirán (entre otros menos audibles) un tono diferencial de 4x1200-3x1000=800 Hz Posteriormente se superpone un tono de 804 Hz. Se puede comprobar perfectamente la aparición de batidos virtuales entre esta última frecuencia y el tono de Tartini de 800 Hz.

Demostración 18: *Tonos de Tartini I.*

Otra posibilidad es presentar de nuevo los mismos tonos de 1000 y 1200 Hz, si bien ahora el segundo se irá elevando paulatinamente hasta 1600 Hz para luego volver a descender hasta su valor inicial. En estas condiciones se puede percibir con nitidez un tono diferencial de Tartini del tipo $4f_1$-$3f_2$ que asciende desde 800 Hz hasta 2400 Hz para luego descender.

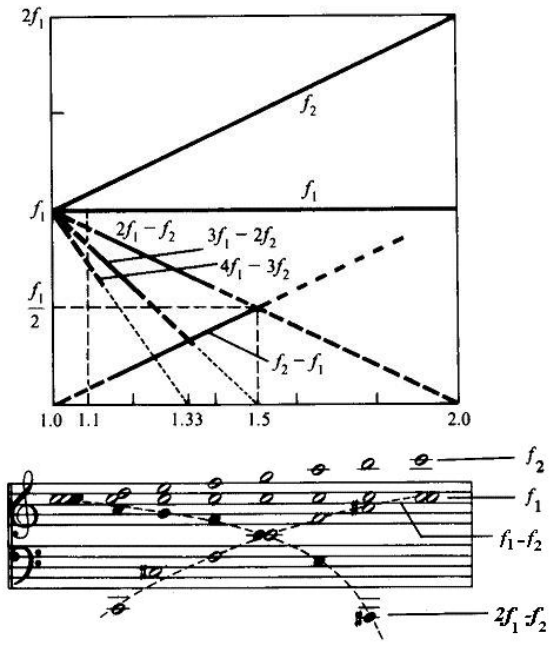


Figura 12 Representación gráfica de los tonos diferenciales producidos por un tono puro cuya frecuencia f_2 crece linealmente desde f_1 hasta 2 f_1 al ser superpuesto a otro tono puro de frecuencia constante e igual a f_1. Los tonos diferenciales representados son f_1-f_2; $2f_1$-f_2; $3f_1$-$2f_2$ y $4f_1$-$3f_2$ (derecha). Arriba se representan en notación musical los sobretonos más audibles.

Demostración 19: *Tonos de Tartini II.*

Finalmente, si se escucha la interpretación del pentagrama superior de la figura 13 efectuada con un instrumento de tesitura aguda y penetrante como, por ejemplo un piccolo, llega a percibirse al propio tiempo la misma melodía, tres octavas más grave, formada por tonos diferenciales

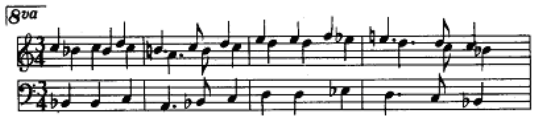


Figura 13 Al escuchar la célebre melodía inglesa "Dios salve a la Reina" interpretada por dos piccolos (pentagrama superior) se percibe esa misma melodía tras octavas más grave, formada por tonos diferenciales (pentagrama inferior).

[3] Georg Andreas Sorge (1703-1778) teórico y compositor alemán que destacó como organista y clavecinista.
[4] Giuseppe Tartini (1692-1770) compositor, violinista y teórico italiano

Efecto "reunión"

Cuando cuatro contertulios conversan animadamente formando un corro, hablando todos al tiempo (situación demasiado frecuente y que exaspera a muchas personas), es posible entender lo que dice el interlocutor de enfrente, pese a la verborrea de los personajes laterales.

La capacidad de distinguir una voz entre muchas se llama efecto de reunión, pudiendo ser muy interesante al presenciar una representación operística o bien para pasar a primer plano los sonidos de los instrumentos de un conjunto de cámara, si tocan cerca del oyente.

Pudiera pensarse que este efecto es sencillamente una cuestión psicológica de atención, pero realmente hay algo más, como demuestra el hecho de que el efecto de reunión se pierde al escuchar por un solo canal de audición (es el caso de las audiciones monoaurales). Supongamos que la persona que habla, a la cual queremos oír está delante de nosotros mientras que las fuentes sonoras que queremos ignorar están dispuestas lateralmente. El sonido emitido por la persona de enfrente, llega a nuestros oídos al mismo tiempo y en fase, lo que da lugar a que sus efectos se sumen y refuercen, cosa que no sucede con los sonidos procedentes de las restantes fuentes.

Efecto de precedencia

Se puede demostrar de forma muy sencilla mediante un equipo estereofónico que reproduzca una grabación monofónica, de manera que salga el mismo sonido por los dos altavoces. Si el oyente se sitúa en posición equidistante de ambos, percibirá el sonido como si proviniese de un foco sonoro imaginario situado en un punto intermedio entre los dos altavoces; pero si está colocado de forma que la diferencia de distancias a uno y otro altavoz sea superior a 30 cm., todo el sonido parecerá llegar del altavoz más cercano.

Este efecto se produce siempre en el interior de un automóvil. Si la intensidad de los dos altavoces es la misma, el conductor escucha sólo el de la izquierda y su acompañante el de la derecha. Uno de los dos puede remediar su situación actuando sobre el mando del balance aunque, eso sí, desarregla definitivamente a la otra persona y, por si fuera poco, él mismo tampoco quedará satisfecho, pues ahora la voz del locutor le parecerá ensanchada y difusa.

Como vemos, el efecto de precedencia es malo para la estereofonía, si bien es bueno para la vida ordinaria y también para escuchar música en vivo. Cuando se oye a un instrumento o a un cantante en una sala de conciertos, sólo una porción del sonido percibido procede de la fuente sonora, mientras que el resto es sonido reflejado en las paredes y en el techo. Este sonido reflejado llega al oído algo más retrasado (en general, unos pocos milisegundos) y se suma a la sonoridad.

Los mecanismos psicofísicos por los que el cerebro interpreta la sensación auditiva le permiten identificar la posición del foco de la forma que ya se explicó (véase la audición binaural), aprovechando para ello el sonido directo. Las ondas sonoras reflejadas, que llegan al oído algo más tarde, sirven para que nos demos cuenta de la distancia a la que se halla el foco. Esto último parece bastante razonable si se tiene en cuenta por ejemplo, que al escuchar la homilía dominical desde la primera fila de bancos de la iglesia, lo que se oye es el sonido directo de la voz del sacerdote, mientras que desde el último banco, se oye un sonido reverberante compuesto en su práctica totalidad por reflexiones.

Es indiscutible que el efecto de precedencia y los ecos son muy importantes en la audición musical. En general, si una de las dos fuentes de un mismo sonido se retrasa en más de 1 milisegundo, la primera fuente "oculta" a la segunda, por cuanto a nuestro sentido de la dirección respecta. Pero si la diferencia de tiempo rebasa los 60 milisegundos, percibiremos un eco (es decir, dos sonidos no simultáneos). Cuando la diferencia de tiempos es inferior al valor anteriormente mencionado, percibiremos el sonido como procedente de la dirección por la que llega el primero y las llegadas posteriores incrementarán su intensidad, dándole una calidad reverberante, imprescindible para todo sonido musical que aspire a ser bueno.

Batidos virtuales

Cuando dos tonos puros de frecuencias próximas f_1 y f_2 se superponen en nuestro oído, percibimos los batidos, caracterizados por una frecuencia promedio $\frac{1}{2}(f_1+f_2)$ cuya intensidad fluctúa periódicamente con la frecuencia (f_1-f_2).

Demostración 20: *Batidos.*

Ahora bien, cuando oímos dos tonos puros separados por un intervalo consonante (octava, quinta, cuarta, etc.) ligeramente desafinado, la diferencia de frecuencias es lo suficientemente grande como para que no parezcan batidos reales. Sin embargo, nuestro cerebro percibe esa desafinación bajo la forma de ligeros altibajos periódicos de la intensidad. A este fenómeno psicoacústico se le denomina *batidos virtuales*.

El fenómeno se puede demostrar presentando, por ejemplo, un tono puro de 1000 Hz y luego otro de 1004 Hz. Al superponer ambos, percibiremos un tono de 1002 Hz cuya intensidad sube y baja con frecuencia de 4 Hz. En segundo lugar se presenta al oído un tono de 1000 Hz seguido de otro a intervalo de octava desafinada (2004 Hz), quinta desafinada (1502 Hz) y cuarta desafinada (1334,67 Hz). En los tres casos, al superponer ambos sonidos, se perciben ligeros batidos virtuales, todos ellos de 4 Hz.

Demostración 21: *Batidos reales y virtuales.*

Otra variante de batidos virtuales es el fenómeno conocido como *batidos binaurales*. Consiste en que, si con ayuda de auriculares estereofónicos, nuestros oídos derecho e izquierdo oyen tonos de frecuencias muy próximas, realmente no hay superposición física de ambas frecuencias, sin embargo nuestro cerebro percibe claramente batidos. Así, por ejemplo, se presenta en el oído izquierdo un tono puro de 250 Hz al tiempo que se presenta en el oído derecho un tono puro de 251 Hz se producirá una sensación virtual en la que la intensidad fluctúa con período de 1 s.

Demostración 22: *Batidos estereofónicos.*

Ilusiones acústicas

Lejos de ser algo negativo, la subjetividad en las respuestas del sistema psicoacústico ante los estímulos es una manifestación de su sofisticación y una prueba de su alto grado de eficiencia. Esta subjetividad no es sólo privativa del sentido de la vista (son muchas las ilusiones ópticas conocidas, siendo algunas de ellas verdaderamente populares) sino que también el sentido del oído es capaz de generar no pocas sensaciones ilusorias.

Nuestro sistema psicoacústico tiende a agrupar de diversas maneras los conjuntos de sonidos presentados como una secuencia compleja. La agrupación de estímulos tiene lugar con arreglo a ciertas reglas basadas en las frecuencias, las amplitudes, en la localización espacial de los emisores e incluso en el timbre. Deutch (1982)[5] establece cuatro reglas o mecanismos cerebrales de agrupación de sonidos:

A) *Principio de proximidad*. El cerebro tiende a agrupar preferentemente aquellos sonidos que sean próximos espacial o temporalmente. La proximidad espacial da la razón por la que los instrumentos o cantores de una misma "cuerda" se sitúan juntos, ello no solo facilita que se oigan entre sí para una mejor afinación de todas las voces sino que, por añadidura, los espectadores reciben los sonidos de cada ejecutante como si provinieran de un mismo foco. Los mecanismos cerebrales de agrupación proporcionan así la cohesión acústica de todo el grupo, necesaria para que la "cuerda" suene bien. Igualmente, la proximidad temporal de los sonidos motiva la puesta en marcha de los mecanismos cerebrales de agrupación. Cuando se escucha una interpretación musical en un recinto cerrado se oyen, primero, el sonido directo y luego las distintas reflexiones en paredes, suelo y techo. Sucede que todas aquellas reflexiones que llegan con un retardo no superior a 60 ms son agrupadas o "añadidas" por el cerebro al sonido directo, aumentando la intensidad de este, la definición de su tono y su calidad *loudness*. Este fenómeno psicoacústico recibe el nombre de *reverberación*, y tiene una importancia capital en la música.

Demostración 23: *Importancia de la reverberación en la música.*

B) Principio de similaridad. El sistema psicoacústico tiende a agrupar todos aquellos sonidos simultáneos que sean similares en frecuencia, timbre, intensidad, etc. La *ilusión de timbre*, que se verá más adelante, es un claro ejemplo de agrupación basada en la similaridad.

C) Principio de la buena continuación. Según este postulado, el cerebro tiende a agrupar sonidos no simultáneos que la intuición considera secuenciados en una dirección dada. Ese es el caso de las ilusiones de *escala* y *cromática*. En ambos casos se pone en juego el recuerdo muy asumido de la escala diatónica, el cual actúa como elemento de agrupación de los sonidos presentados a ambos oídos, aparentemente caóticos.

D) Principio del destino común. La mente tiende a agrupar secuencias de sonidos que apuntan a un destino o resolución determinada. En cierto modo, la consistencia de una coda o un obstinato en una composición musical debe tener su razón de ser en el efecto de agrupación que genera en el cerebro tras su audición repetida.

El conocimiento de las ilusiones acústicas es importante en la comprensión del fenómeno musical toda vez que, con frecuencia, se producen a lo largo de una audición. Veamos algunas de ellas.

Ilusión de octava

Para percibir esta ilusión, mediante cascos de auriculares estereofónicos, se presentará al oído derecho un sonido agudo y, simultáneamente al izquierdo, un sonido grave a octava baja del primero. Luego la situación se invertirá, de forma que al oído

[5] DEUTCH, D. (1982) *The psychology of Music.* Academic Press. (London)

derecho se le presentará el sonido grave y al izquierdo el agudo. De nuevo la situación se invertirá, una, y otra, y otra vez.

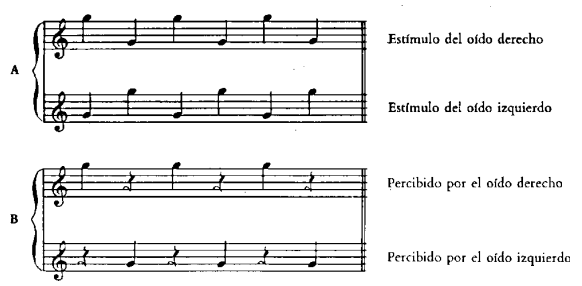


Figura 14 Representación de la ilusión de octava en notación musical. En **A** figuran los sonidos presentados a ambos oídos y en **B** las sensaciones

En estas condiciones el cerebro reacciona, de forma que el oído derecho ignora los sonidos graves y el izquierdo los agudos. A este fenómeno psicoacústico se le conoce como "la ilusión de octava"

Demostración 24: *Ilusión de octava.*

Ilusión de escala

A los oídos izquierdo y derecho se les presenta alternativamente notas de una escala descendente y ascendente. De nuevo el cerebro "pone orden en el caos" especializando al oído derecho en la percepción de tonos agudos y al izquierdo en los graves. La sensación global es que el oído derecho oye una escala que primero desciende y luego asciende, en tanto que el oído izquierdo oye una escala primero ascendente y luego descendente.

Demostración 25: *Ilusión de escala.*

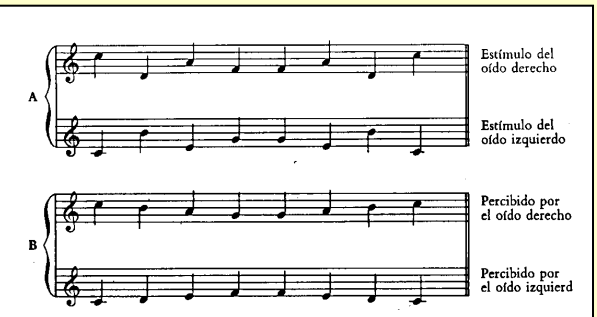


Figura 15 Representación de la ilusión de escala en notación musical. En **A** figuran los sonidos presentados a ambos oídos y en **B** las sensaciones percibidas.

Ilusión de timbre

Nuestro cerebro tiende a seguir sonidos sucesivos de timbre similar y distinta altura. Así, si a uno y otro oídos se presentan sucesiones rápidas de notas interpretadas aleatoriamente con dos timbres suficientemente dispares, el cerebro tiende a "poner orden" en este caos "especializando" a cada oído en la percepción de un timbre, y sólo uno. El fenómeno se puede demostrar mediante casco de auriculares estereofónicos. Se presentan a ambos oídos, *en primer lugar,* series repetitivas de tres notas ascendentes interpretadas con el mismo timbre.

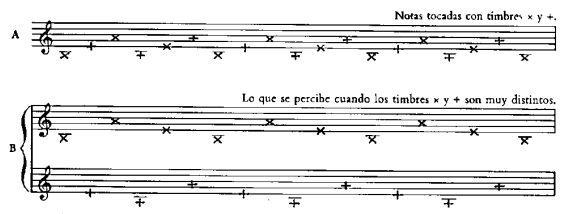


Figura 16 Representación de la ilusión de timbre en notación musical. Los símbolos $x, \overline{x}, +$ representan sonidos de tres timbres diferentes muy dispares.

En segundo lugar se presentan esas mismas series, si bien ahora todas las notas pares suenan con un timbre y las impares con otro bastante diferenciado. El oído derecho tiende a percibir sólo uno de ellos y el izquierdo el otro. De esta forma, parecerá que oímos series descendentes de tres notas con distinto timbre a uno y otro lado de nuestra cabeza.

Demostración 26*: Ilusión de timbre.*

Ilusión de Shephard

Cuando oímos un sonido complejo cuyos parciales son desplazados regularmente hacia arriba, en tanto que el nivel de intensidad de dichos parciales se mantiene fijo, tenemos la sensación de escuchar una escala permanentemente ascendente. A este fenómeno psicoacústico se le conoce como *ilusión de Shephard*

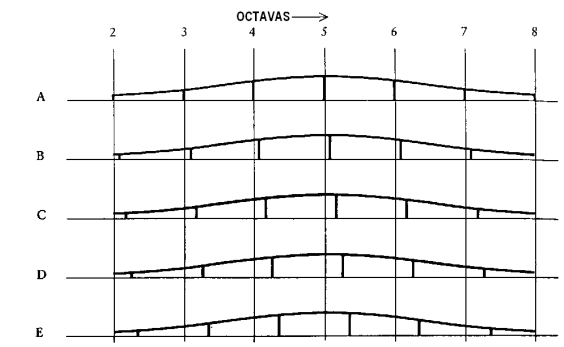


Figura 10.31 Ilusión de Shephard

Demostración 27: *Ilusión de Shephard.*

Pero este fenómeno puede ir aún más lejos. Si mientras las octavas se deslizan hacia abajo, el pico de la distribución espectral se desliza hacia arriba,

esto es, los componentes superiores se refuerzan mientras los inferiores se debilitan, el cerebro percibe un tono virtual que parece descender al tiempo que asciende.

Demostración 28: *Un tono a la vez ascendente y descendente.*

Conclusiones

En los textos de Física se aborda los conceptos de tono y timbre desde un planteamiento reduccionista, identificando el primero con la frecuencia fundamental del tono complejo y el segundo como la sensación detraída de la frecuencia fundamental y sus armónicos superiores.

Con frecuencia se asume que los sonidos reales son complejos, formados por una frecuencia fundamental responsable de la altura y unas frecuencias superiores duplo, triplo, cuádruplo, etc. responsables de la sensación tímbrica. En realidad los sonidos están formados por diversas frecuencias llamadas *parciales,* que no son múltiplos exactos de la frecuencia fundamental, reservándose el nombre *armónicos* para aquellas frecuencias que son múltiplos exactos, cosa que casi nunca sucede.

La sensación tonal la obtiene el cerebro por medios no suficientemente claros, por un lado parece que el ritmo con que llegan los impulsos acústicos es determinante, según postula la *Teoría de la Periodicidad* y por otro parece que lo importante es el punto de la membrana basilar que ha sido excitado, como preconiza la *Teoría de la Localización*. Sea cual fuere, los mecanismos cerebrales de la audición no solo se ajustan a uno y otro planteamiento sino van mucho más lejos, como se evidencia en la percepción de los tonos virtuales y de combinación, donde la excitación física directa no existe.

Finalmente, las sensaciones acústicas ni son proporcionales a las excitaciones ni se corresponden directamente con ellas. Las ilusiones acústicas de octava, de escala, de timbre, etc. son algunas de las existentes, pero no todas y evidencian la complejidad de los mecanismos cerebrales de la audición y lo poco que se sabe de ellos.

Para saber más

BÉKÉSY, G.V., (1960) *"Experiments in hearing"* Acoustical Society of America

BLAUERT, J. (1997) *"Spatial Hearing"* The MIT Press, London

EVEREST, F.A., (2001) *"Master Handbook of acoustics"* Mc Graw Hill, New York

HALL, D.E., (1980) *"Musical Acoustics"* Brooks-Cole Publ. Company, Pacific Grove, California.

HELMHOLTZ, H. (1954) *"On the sensations of tone"* Dover Publ., inc., New York

KINSLER, L.E., FREY, A.R., COPPENS, A.B. Y SANDERS, J.V., (1992) *"Fundamentos de Acústica"* Editorial Limusa, S.A., Noriega Eds., México.

MERINO, M. (1998) "Complexity of pitch and timbre concepts", *Phys. Educ.*, 33, 2,

MOORE, B.C.J., (1997) *"An introduction to the Psychology of hearing"* Academic Press, San Diego.

PIERCE, J.R., (1983) *"The science of musical sound"* Freeman and Company, Eds., New York

RAICHEL, D.R., (2000) *The science and applications of Acoustics"* Springer-Verlag Eds., New York

RAYLEIGH, J.W.S., (1945) *"The theory of sound"* Dover Publ., Inc., New York

RECUERO, M., (2000) *"Ingeniería Acústica"* Paraninfo, Ed., Madrid

ROSSING, T.D., (1990) *"The science of sound"* Addinson-Wesley Publ., New York

ROSSING, T.D. & FLETCHER, N.H. (1995) *"Principles of vibration and sound"* Springer-Verlag Eds., New York

Nota editorial

La descarga de los audiovisuales se produce en formato Power Point tipo auto presentación; sin embargo, dependiendo del navegador utilizado puede abrir el archivo en formato edición. El lector deberá reproducir la presentación para acceder al sonido de cada diapositiva. Se recomienda el uso de auriculares para la audición de las demostraciones.

La totalidad de los contenidos de este artículo, así como los de otros que pudieran ser continuación de éste, formaron parte de los materiales elaborados para la tesis de D. Eduardo Verde Romera, bajo la dirección del Dr. M. Merino (autor principal del artículo) quien fue galardonado con el Premio de la Real Academia de Doctores de España en 2010 y por el Colegio de Doctores y Licenciados en 2011.

Estos contenidos pueden ser consultados de forma más exhaustiva en el Tratado "Las vibraciones de la música", de J. M. Merino, cuya ficha puede ser consultada en el siguiente enlace URL: http://www.editorial-club-universitario.es/libro.asp?ref=2232

Los sonidos raros del violonchelo

Arturo Daniel García Vesga
Alumno del Grado en Física. Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid

Los instrumentos de cuerda tienen, a ojos de muchos de nosotros, un sonido muy agradable. Sin embargo su sonido a veces tiene fallos, que si bien no los apreciamos en ciertos casos, están ahí, y tarde o temprano acaban apareciendo. Vamos a "asomarnos" un poco al sonido de un violonchelo, descubriremos que no es exactamente lo que esperábamos.

Introducción

Hoy en día tenemos mucha información sobre la música, el porqué, su filosofía, métodos de composición e interpretación, etc. También conocemos de manera bastante profunda los mecanismos físicos que la producen y por los cuales el sonido se transmite a nosotros, sin embargo, a la hora de llevar la música al ámbito electrónico, los métodos que usamos para reproducir y transmitir los sonidos (por ejemplo, en la radio se usa la modificación de la frecuencia o amplitud de la onda) son métodos de simplificación de la onda para poder transmitirla y almacenarla de manera más económica (como hace el formato mp3), en estas simplificaciones, muchos efectos analógicos se pierden. Por ello, aquí presentamos un estudio sobre la forma de onda estricta de la vibración libre de una cuerda de violonchelo. Este será un ejemplo más del gran potencial que tiene la transformada de Fourier para estudiar sistemas vibrantes.

Los sonidos más relacionados

Para comenzar, daremos unas pinceladas a la producción de sonido en el violonchelo. Como estamos estudiando la vibración de una cuerda libre; es decir, sin nada que fuerce su vibración, la técnica empleada para obtener la muestra a analizar será el llamado pizzicato, que consiste en pulsar la cuerda del instrumento, como en una guitarra. Este tipo de producción de sonido en los instrumentos de cuerda frotada es la más relacionada con el instrumento en sí, pues su evolución en el tiempo depende únicamente de la arquitectura del mismo instrumento y, claro está, del ambiente donde se genere, pero no de la manera de producción, como le ocurre al arco frotado; podemos decir que un violonchelista, con cuidado, puede hacer que un violonchelo suene a violín, si toca con el arco.

Debe quedar claro que en los instrumentos musicales, el sonido no sólo es producido por el cuerpo vibrante, en este caso la cuerda; intervienen otros muchos factores, también vibrantes, que conforman el sonido, como son, en el caso del violonchelo la caja de resonancia (que junto con el aire de su interior se comporta como un resonador Helmholtz), la pica, que en contacto con el suelo transmite parte de la vibración al mismo y el entorno en el que se produzca el sonido. Así, la onda que vamos a estudiar es la síntesis de todos estos factores en una sola onda que recoge un micrófono.

¡Que viene el lobo!

Los instrumentos de cuerda tienen unas características en su producción del sonido, por su forma y su manera de vibrar, que les proporcionan un timbre muy especial. Sin embargo, por los mismos motivos aparecen fenómenos menos deseables que muchas veces pueden llegar a estropear el sonido, como es el llamado lobo.

El lobo es un efecto de amplificación de frecuencias que tiene el cello. Por su propia arquitectura y demás factores de los que hemos hablado, se amplifican ciertas frecuencias fijas más de lo debido. Esto en principio no debería ser ninguna molestia, sin embargo debemos tener en cuenta que el sonido es el compendio de muchas vibraciones. Al producir un sonido con el instrumento, una parte muy relevante de las frecuencias que lo conforman viene dada por la vibración de cierta frecuencia de la cuerda. Pero como hemos dicho, la cuerda no está sola, y al vibrar junto a otros elementos, la composición final de frecuencias del sonido es la que determinan todos estos elementos. Aquí surge el problema, si tenemos muchos elementos vibrando a la vez, querremos que todos vibren con frecuencias al menos relacionadas

Revista de Ciencias, 3, 33-37, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

de una manera más o menos simple, musicalmente hablando, para que el resultado sea fácil de escuchar.

Es en este momento cuando el lobo entra en escena, ciertos elementos relacionados con la caja, al vibrar, fomentan siempre la misma frecuencia, con lo que si estamos produciendo un sonido que tenga una frecuencia que no esté relacionada de manera simple con la frecuencia que se fomenta (llamémosla "mala"), el resultado será desagradable musicalmente hablando. En concreto, si la frecuencia producida es cercana a la mala, el resultado serán unos batidos en la intensidad del sonido; lo que aquí ocurre lo podemos ver desde un punto de vista puramente matemático, pues sabemos que cuando sumamos, por ejemplo, dos cosenos de frecuencias cercanas, el resultado son unos pulsos en la amplitud que tienen una frecuencia que es igual a: (Freq2–Freq1)/2

Obteniendo las muestras

Así, parece interesante, no sólo estudiar un sonido producido mediante el pizzicato, pues, gracias a numerosos estudios, sabemos que lo que obtendremos será una "columna" de armónicos, relacionados entre sí mediante múltiplos enteros, respecto a la frecuencia fundamental, de acuerdo con el teorema de Fourier. Vamos entonces a observar una muestra de sonido producida cerca del lobo, con el fin de cuantificar los efectos anómalos que puedan darse en esta columna de armónicos.

Para hacer la grabación usamos un micrófono de 96 kHz de frecuencia de muestreo, para tener una buena resolución, situado a 10 cm del violonchelo a la altura del puente. Para la grabación y el tratamiento de los sonidos brutos usaremos el programa de edición musical Cool Edit®, y para el estudio de la onda, el programa matemático Matlab®.

El pizzicato lo vamos a producir pulsando un punto situado en la mitad de la cuerda Re del violonchelo (que proporciona la nota re 2), con el fin de que la onda producida fuera lo más pura posible, pues si producimos el sonido pulsando un punto situado en la parte de debajo de la cuerda, aparece una diferencia en el tiempo en que refleja la onda en los extremos que introduce una periodicidad a mayores que hace más complejo el sonido, aunque se comprueba que la diferencia que introduce este efecto es mínimo. Veamos entonces que ocurre con este sonido.

La onda en el tiempo

La onda en el tiempo se representa en la figura 1.

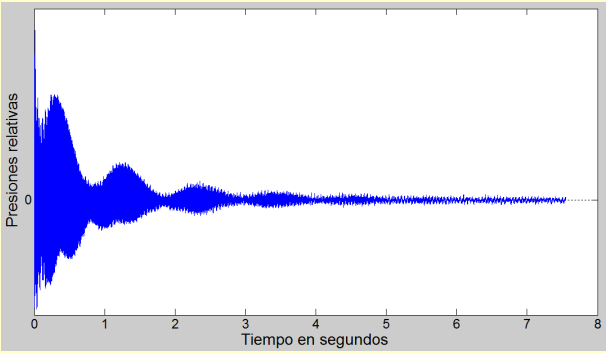


Figura 1: Onda completa (dominio del tiempo).

Vemos que el *sample* no es homogéneo en el tiempo, en el sentido de que se observan claramente varias zonas en el mismo con ligeras diferencias de comportamiento.

Así, en primer lugar, observando la onda globalmente, vemos unos pulsos con un período de algo menos de un segundo precedidos de una zona irregular que corresponde al ataque de la nota y una envolvente exponencial que describe el comportamiento hasta la mitad de la onda de manera clara, pues se aprecia que posteriormente tenemos una zona estable en amplitud, debido a que la amplitud de vibración ya se ha amortiguado lo suficiente como para que los efectos disipativos relacionados con la elasticidad de la cuerda hayan "desaparecido".

Al "acercarnos" a la onda en la figura 2, vemos su forma concreta, esta varía con el tiempo, es decir, no es constante, sino que presenta unos picos que se van "moviendo" por la onda a lo largo de su evolución. Finalmente se observa otra diferencia importante de comportamiento entre la parte inicial, hasta los 4 segundos y medio, donde la forma de onda es variable, pero regular (el mismo patrón se repite) y la parte final, que no sólo presenta rugosidad por el ruido ambiente (al ser la potencia sonora pequeña, los sonidos del ambiente afectan a la grabación), si no que aparecen formas y periodicidades nuevas que antes no estaban.

Si observamos con atención, vemos que las nuevas formas que aparecen al final tienen similitudes con las anteriores, lo cual es lógico, pues al fin y al cabo, es el mismo sonido.

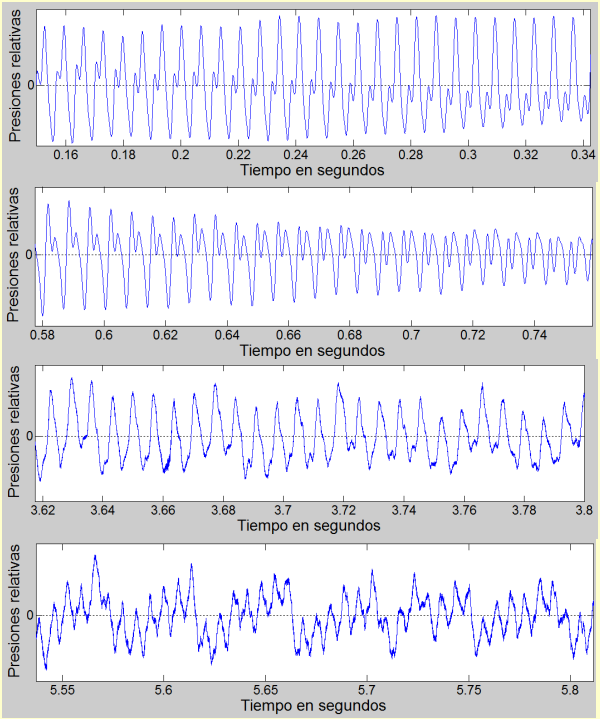


Figura 2: Partes inicial (suave y regular) y final (rugosa y con nuevas periodicidades)

La onda en frecuencias

En la figura 3 tenemos la transformada de Fourier de la onda completa.

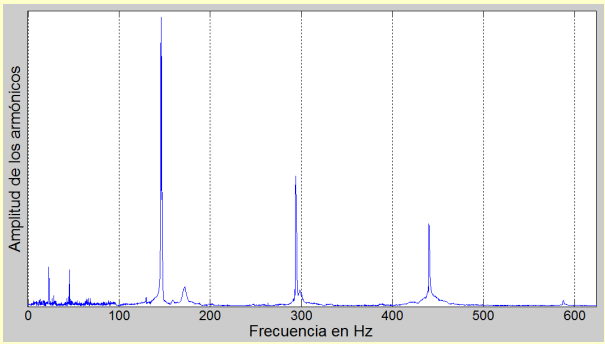


Figura 3: Cuatro primeros armónicos de la transformada de Fourier de la onda completa, se observa un pico pequeño al lado del armónico fundamental (pico más alto), es el llamado lobo. También observamos los picos de baja frecuencia que corresponden a las periodicidades nuevas del final de la onda

A simple vista, predominan los armónicos fundamentales (que corresponden a la frecuencia de la nota y sus múltiplos), y sabemos que las relaciones de amplitud entre los armónicos son las que determinan el timbre. También tenemos otras frecuencias destacadas en las frecuencias bajas (22 y 45 Hz), unos picos a los que contribuirá esencialmente la parte final (si al hacer la transformada de Fourier no estuviera esa parte final, estos picos de baja frecuencia no aparecerían) y corresponden a estas nuevas periodicidades que aparecían. También podemos apreciar que la frecuencia fundamental, de 145.78 Hz, tiene a su lado uno pico "hijo" al que contribuirá más la parte inicial de la onda y que corresponde al famoso lobo (en este violonchelo, como en muchos otros, aparece en los 172 Hz, que corresponde a la nota Fa 2). El lobo se fomenta sobre todo en la parte inicial de la onda, cuando se produce el sonido. Ello es porque cuando se inicia el sonido, la cuerda tiene suficiente energía como para transmitir una parte a los elementos adyacentes que fomentan esa vibración y "añadan" esa frecuencia. Este pico en 172 Hz aparece en mayor o menor medida en la mayoría de muestras tomada con el instrumento. Examinemos ahora el pico fundamental, que está cerca del lobo, tal y como se muestra en la figura 4 .

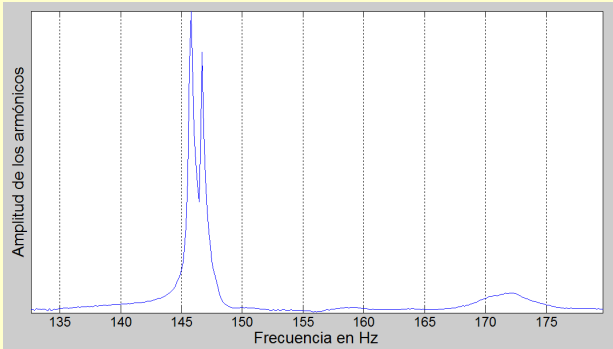


Figura 4: Detalle del pico fundamental, se observa una bifurcación en dos picos (145.78, y 146.7 Hz)

Así, tenemos que la frecuencia fundamental (frecuencia por la cual identificamos la nota) es la de 145.78 Hz (correspondiente a la nota Re 2) y tiene muy cercana una frecuencia de 146.7 Hz (se aprecia que el pico fundamental, a la izquierda, se "desdobla" en dos picos). Este pico doble es el efecto que tienen los pulsos en la transformada de Fourier (matemáticamente hemos dicho que los pulsos son suma de frecuencias cercanas). También observamos en muestras de otros sonidos con el instrumento, que esta bifurcación en el armónico (fundamental o no) aparece siempre en el que está cerca del lobo.

Análisis de los armónicos y modelo

En vista de las características de la onda, entendemos que la onda (al menos la parte estable) se podrá expresar matemáticamente como:

$$\text{Onda} = \sum \text{Armónicos}$$

Donde tenemos:

$$\text{Armónico}_n = A_{\text{relativa},\, n} * \cos(\theta_n\, t) * e^{-a_n t} * \cos(\omega_n\, t + \varphi_n(t))$$

Así, tenemos que cada armónico tendrá una amplitud inicial relativa al primero (esta relación entre los pesos de cada armónico nos proporcionará el timbre del instrumento), los armónicos tendrán una envolvente compuesta por un coseno (los batidos) y una exponencial (por el fenómeno de atenuación propia de la cuerda libre real), y cada armónico tendrá una frecuencia ω_n que será, en principio, un múltiplo de la frecuencia principal (ω_n = 145.78, 145.78 * 2, etc.).

La función cosenoidal tendrá además una fase que dependerá linealmente del tiempo ($\varphi(t)$), pues hemos visto que la forma de la onda no es constante con el tiempo, si no que varía su forma. Lo haremos depender de manera que sea relativo al primer armónico, con lo que finalmente, la frecuencia de cada armónico no será un múltiplo exacto de la principal, tendrá un pequeño desfase que nos proporcionará la forma variable que queremos.

Antes de nada, debe quedar claro que la parte que intentamos modelizar es la parte inicial de la onda, pues es la parte que predomina en el sonido (la parte final es casi inaudible) y es también la zona con más regularidad. Tampoco nos ocupa ahora el modelizado del ataque, que tiene más complejidad. Dado que los armónicos que están por encima del cuarto no tienen casi relevancia, en el modelo introduciremos únicamente cuatro armónicos.

Para dar forma a un modelo, tenemos que estudiar cada armónico por separado, para ello nos ayudaremos de nuevo de la transformada de Fourier, pues si vamos analizando cada pocos períodos la onda, dado que la transformada nos da números complejos, tendremos información de la evolución de los armónicos en amplitud y fase en el tiempo. Las amplitudes en valor absoluto de los armónicos a lo largo del tiempo son las que aparecen en la figura 5.

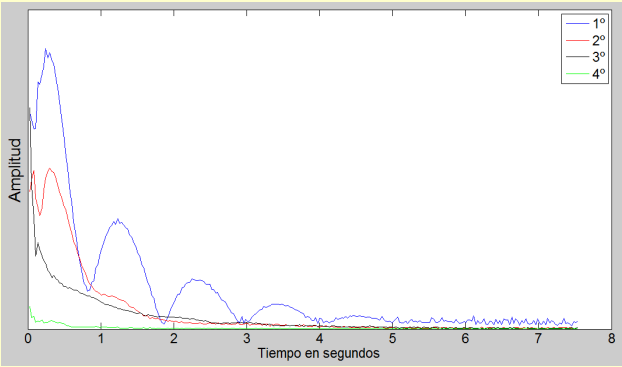


Figura 5: Amplitudes (en valor absoluto) de cada armónico en función del tiempo

Veamos qué ocurre aquí: en los primeros instantes aparece una zona de inestabilidad en los dos primeros armónicos (es la parte donde se produce el sonido), la zona intermedia, hasta los 4 segundos y medio es la parte más regular y cuando percibimos esencialmente la nota, porque la zona final es demasiado tenue al permanecer sonando únicamente el primer armónico (sin atenuación y con ruido ambiente, como dijimos). Esta es la zona final donde aparecían las periodicidades nuevas y el comportamiento más inestable.

Se observa que el único armónico que presenta el efecto de los pulsos es el primero, lo cual concuerda con la explicación anterior (pues es el que estaba más cerca del pico del Fa 2). Todos los armónicos, hasta los 4 segundos y medio, presentan la envolvente exponencial. Las fases de cada armónico a lo largo del tiempo son las que aparecen en la figura 6.

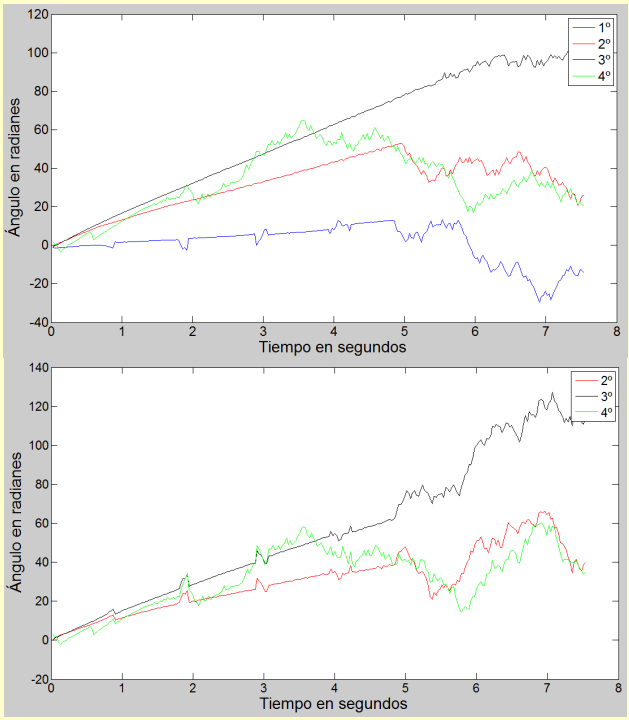


Figura 6: Fases de los armónicos (absolutas y relativas al primer armónico) de la onda estudiada, existe una relación en los ajustes las pendientes de 4.5*Nº de Armónico

En la figura 6 observamos que las fases de los armónicos 2, 3, y 4 se van adelantando al primero, como habíamos supuesto (la forma de onda va cambiando porque en cada momento la "suma" de los armónicos superiores está desfasada y el desfase va cambiando); las que presentan un comportamiento más lineal son las del primero, segundo y tercer armónico (pues al tener más peso, son más fáciles de analizar y tenemos más resolución). Y hasta los tres segundos, el comportamiento de todas las fases es bastante suave, aunque en el primer armónico se observan zonas de perturbación que coinciden con los

mínimos de la envolvente, cuando su amplitud cambia de signo abruptamente (porque realmente la envolvente es un coseno). El desfase (la pendiente de las fases de cada armónico relativas al primer armónico) en este caso, según el ajuste lineal depende del número de armónico y es de 4.5*Nº de Armónico en las fases relativas al primer armónico. A partir de los 5 segundos, en la zona de inestabilidad, las fases comienzan a presentar un comportamiento mucho menos definido. Para el modelo tendremos que emplear el ajuste de las fases relativas al primer armónico, que hemos conseguido con una simple resta (figura 6, abajo).

Finalmente, si ajustamos las curvas (en la zona estable), y usamos el modelo propuesto de suma de armónicos, conseguimos la siguiente onda, representada en la figura 7.

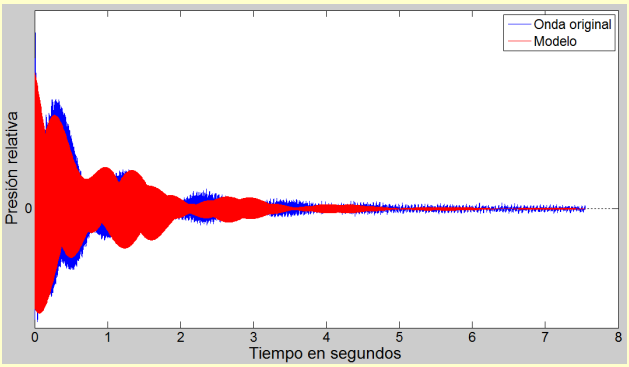


Figura 7: Modelo de la onda (en rojo) y la onda original

Este modelo se ha conseguido usando únicamente la suma de los cuatro primeros armónicos, y vemos que se ajusta bastante bien (como no hemos tenido en cuenta la zona final hay una clara diferencia entre la tendencia del modelo y la onda original), incluso en las formas que va adoptando y la sensación sonora que da cuando se reproduce (ver figura 8):

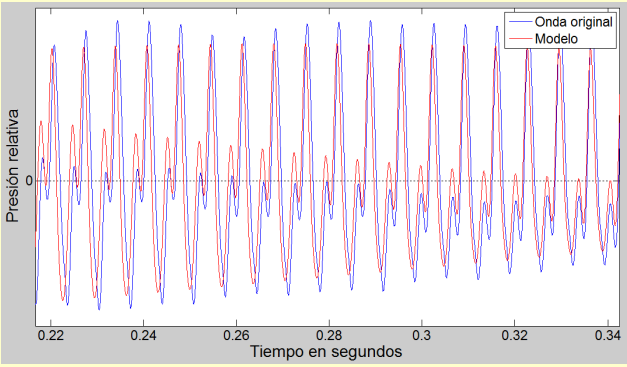


Figura 8: ¡Las formas de la onda y el modelo se parecen!

Conclusión

Finalmente, vemos que con la suma de cuatro armónicos hemos podido reproducir la onda inicial en su parte más importante (la parte audible). También hemos observado que, al estar la frecuencia fundamental cerca de una frecuencia parásita (como es el lobo), aparece el fenómeno de los batidos, tan temidos entre los instrumentistas. Así, cerca del lobo, los armónicos tienen una frecuencia que no es un múltiplo exacto del fundamental, si no que tienen un desfase que depende linealmente del número de armónico. Todo eso provoca que, en este caso, los armónicos que siguen al fundamental sean (virtualmente) múltiplos de una frecuencia $4.5/2\pi = 0.716$ Hz (dividimos por 2π porque 4.5 es una cantidad en radianes, unidad natural de las fases que obtuvimos) mayor que la frecuencia fundamental (que corresponde a ese pico secundario de $145.78 + 0.716 \approx 146.5$ Hz).

Para saber más

ROSSING D. T., (1990) "*The science of sound*" Addison-Wesley
MERINO DE LA FUENTE J. M., (2006) "*Las vibraciones de la música*" Editorial Club Universitario
TOWNE D. H., (1988) "*Wave phenomena*" Dover

Contaminación lumínica: una asignatura pendiente

Fernando Cabrerizo
Miembro de la "Sociedad Astronómica Syrma", y de "Cel Fosc, Asociación contra la Contaminación Lumínica

En la escala de enemigos públicos de la investigación astronómica en España, la contaminación lumínica ocupa actualmente el segundo puesto. Hasta hace poco estaba la primera, pero los presupuestos (o más bien la falta de ellos) se han hecho con esa primera plaza en el ranking.

Introducción

Como poco podemos hacer para defendernos de ese primer enemigo desde estas líneas, vamos a tratar de conocer un poco mejor a esa contaminación de la que apenas se oye hablar pero que poco a poco nos aparta del cielo estrellado y de la influencia que éste ha tenido a lo largo de la historia de la humanidad. No deja de resultar paradójico que en la época histórica en la que mejor conocemos el Universo, más complicado resulta observarlo.

Podemos retrotraernos en la historia hasta la revolución industrial, entre los siglos XVIII y XIX, y ponernos en la piel de los habitantes de las cada vez más grandes ciudades, orgullosos de la prosperidad y riqueza de sus fábricas. La contrapartida es que las ciudades se llenan de humo y vertidos procedentes de los diferentes procesos industriales, pero precisamente la contaminación es una demostración de la prosperidad de la ciudad.

En nuestros días tenemos interiorizado que cuanta más luz, mejor. La luz nos hace sentir seguros aunque no lo estemos, la oscuridad representa lo desconocido y lo desconocido nos da miedo. Y una ciudad cuyas luces se ven desde lejos y que cubren gran parte del horizonte se nos presenta como una ciudad próspera de la que sentirnos orgullosos... al igual que los ciudadanos de la revolución industrial orgullosos de sus ciudades contaminadas de humo.
Podemos viajar a pueblos apartados, en los que apenas viven unas pocas personas, iluminados muy por encima de los parámetros recomendados. Pueblos en los que apenas hay servicios y en los que apenas se invierte, pero en los que no falta una derrochadora instalación de alumbrado público. Esta estrategia 'inversora' quedaba recogida en esta viñeta del dibujante JM Nieto publicada el 20 de septiembre de 2009 en el diario El Mundo.

La contaminación lumínica no sólo es un problema a la hora de observar el firmamento, supone también una alteración del ecosistema, despistando a las aves migratorias, atrayendo insectos, o cambiando las costumbres de la fauna nocturna que posee una visión adaptada por la evolución a noches oscuras, pero que se presentan artificialmente iluminadas en la actualidad.

La intrusión lumínica es otro factor a tener en cuenta, la luz del alumbrado nocturno entra en nuestras casas afectando a nuestro reloj biológico. La melatonina es una hormona que segrega nuestro cuerpo en función de la luz ambiente. La exposición a niveles de luz durante el descanso nocturno reduce la cantidad de melatonina generada por la glándula pineal, reduciendo así la capacidad antioxidante de nuestro organismo y la capacidad de neutralización de radicales libres.

¿Qué podemos hacer para contener la contaminación lumínica? Hay unos cuantos factores a tener en cuenta a la hora de realizar una correcta iluminación urbana, principal contribuyente a la contaminación lumínica. Pero no se trata de no iluminar, si no de iluminar mejor.

Revista de Ciencias, 3, 38-42, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

Viñeta del dibujante JM Nieto publicada el 20 de septiembre de 2009 en el diario El Mundo

Diseño de las luminarias

En una farola la luminaria es la estructura que engloba la lámpara y será la que marque fundamentalmente la distribución de la luz emitida. Se debe tender a farolas con un Flujo al Hemisferio Superior (FHS) del 0%, esto es, que toda la luz emitida por la lampara sea dirigida hacia abajo. Más allá de unas decenas de metros no deberíamos ver la propia lámpara o la mayor parte de los reflejos directos en la luminaria.

Dos farolas, una contaminante y otra respetuosa con el medio nocturno.

Tipo de lámpara

Otro factor muy importante es la tecnología de la lámpara. Según la utilizada obtendremos luz con diferente tonalidad. Desde el punto de vista de la contaminación lumínica la luz anaranjada, frecuentemente utilizada en iluminación urbana, es la mejor. La luz blanca y azulada se dispersa con más facilidad en la atmósfera (por eso el cielo es azul) y por lo tanto es más contaminante.

En astronomía es frecuente utilizar filtros para observar sólo el ancho de banda concreto en el que emite el objeto de estudio. Con farolas emitiendo luz blanca en todo el espectro obtendremos más contaminación en la imagen que con farolas con una luz discreta que emitan luz en longitudes de onda específicas que nos permita filtrarlas sencillamente.

Podemos comparar algunos espectros de diferentes lámparas (véase la figura del texto)

Las lámparas de vapor de sodio (alta y baja presión) y LED-ámbar son las más indicadas para reducir la contaminación lumínica, pues emiten solo en determinadas zonas del espectro evitando las longitudes de onda más cortas (azules), que son las que más se dispersan, las que más afectan a la fauna, y las que más influencia tienen sobre nuestra propia fisiología. Ahora bien, estas lámparas se caracterizan por su coloración anaranjada, mucho más intensa en el caso de las de vapor de sodio a baja presión. Y aunque son las más interesantes de cara a luchar contra la contaminación lumínica, existen circunstancias en las que su bajo índice de reproducción cromática resulta poco acertado. Es decir, en aquellos casos en los que es deseable una buena reproducción cromática (zonas comerciales,

vallas publicitarias, o iluminación ornamental, por ejemplo) es lógico acudir a lámparas con luz blanca, pero ésta no debería generalizarse al total de la iluminación urbana.

Potencia de la lámpara

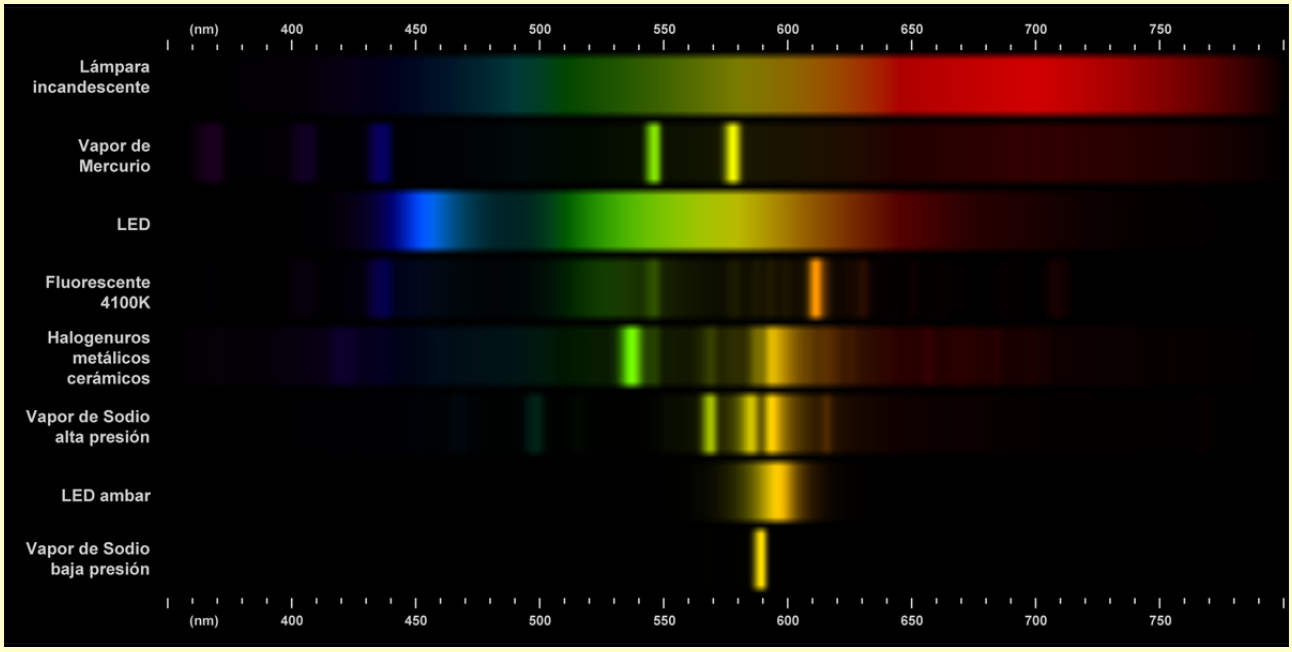
La potencia de las lámparas debe también ajustarse a la zona a iluminar, de tal manera que el conjunto de lámpara y luminaria proyecte y distribuya la cantidad adecuada de luz en cada caso. En general, las necesidades de iluminación en España vienen recogidas por el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior:

http://www.boe.es/boe/dias/2008/11/19/pdfs/A45988-46057.pdf

Horarios de iluminación

Las necesidades de iluminación en una ciudad no son iguales a lo largo de la noche. Quizás donde más evidente sea esta circunstancia es en la iluminación ornamental. Resulta imprescindible resaltar esos monumentos de los que nos sentimos orgullosos, también desde un punto de vista turístico. Pero ¿cuántos turistas pueden estar un martes a las 3 de la mañana contemplando esa fantástica fachada plateresca? Evidentemente se hace necesario adaptar los horarios de iluminación a la actividad de la propia ciudad. Aunque quizás el futuro sea la adaptación inteligente:

https://vimeo.com/68833939



Comparación de algunos espectros de diferentes lámparas

Distribución general de la iluminación

Otro punto a tener en cuenta es la distribución de los puntos de luz. ¿Iluminamos un área extensa con un foco potente en altura, o con varios puntos de luz distribuidos? En general son varios los factores a valorar, como por ejemplo la facilidad de la instalación y el mantenimiento, o el vandalismo de la zona. Pero en cuanto a iluminación siempre es mejor varios puntos de luz que iluminen uniformemente el área, que grandes focos que generan zonas muy iluminadas pero también sombras muy oscuras. Es preferible una iluminación suave y uniforme que evite deslumbramientos y permita la adaptación de los ojos a ese nivel de luz, que áreas muy contrastadas en las que pasamos de estar deslumbrados por exceso de luz a no ver nada en las sombras. Y aunque normalmente tendemos a sentirnos más seguros en la presencia de grandes focos de luz, en la práctica es más segura una iluminación uniforme.

¿Cómo podemos saber si contaminamos más o menos?

Farola 'fernandina' con un buen diseño inicial estropeado por una tulipa que envía luz hacia arriba, que deslumbra, y que con el tiempo se ensucia. Imagen de una farola de la calle Colón de Valladolid.

Midiendo la contaminación lumínica

Existen diferentes técnicas para medir la contaminación lumínica. Podemos simplemente hacer una foto y repetirla de vez en cuando con los mismos parámetros de exposición para ver cómo evoluciona la contaminación de un sitio concreto, o podemos comparar diferentes sitios de observación si hacemos siempre la foto igual. Pero esta técnica no es muy fiable para comparar observaciones de diferentes personas con diferentes cámaras, al menos no sin un trabajo de calibración importante.

Una técnica más interesante es el proyecto IACO (Investigación y Acción sobre Cielo Oscuro) [http://www.iaco.es], una iniciativa de la Sociedad Malagueña de Astronomía. Consiste en la convocatoria de diferentes campañas durante las cuales los participantes tienen que observar determinadas constelaciones y compararlas con mapas estelares de esa zona del cielo con diferentes cantidades de estrellas visibles en cada uno. Según el mapa que se parezca más a lo que ves obtendrás la puntuación de tu cielo. Se trata de una variación de la técnica MALE (MAgnitud Límite Estelar), muy usada por parte de los astrónomos aficionados. El proyecto IACO es una actividad muy interesante para centros de enseñanza, pues los alumnos obtienen una rápida constatación del cielo que nos estamos perdiendo.

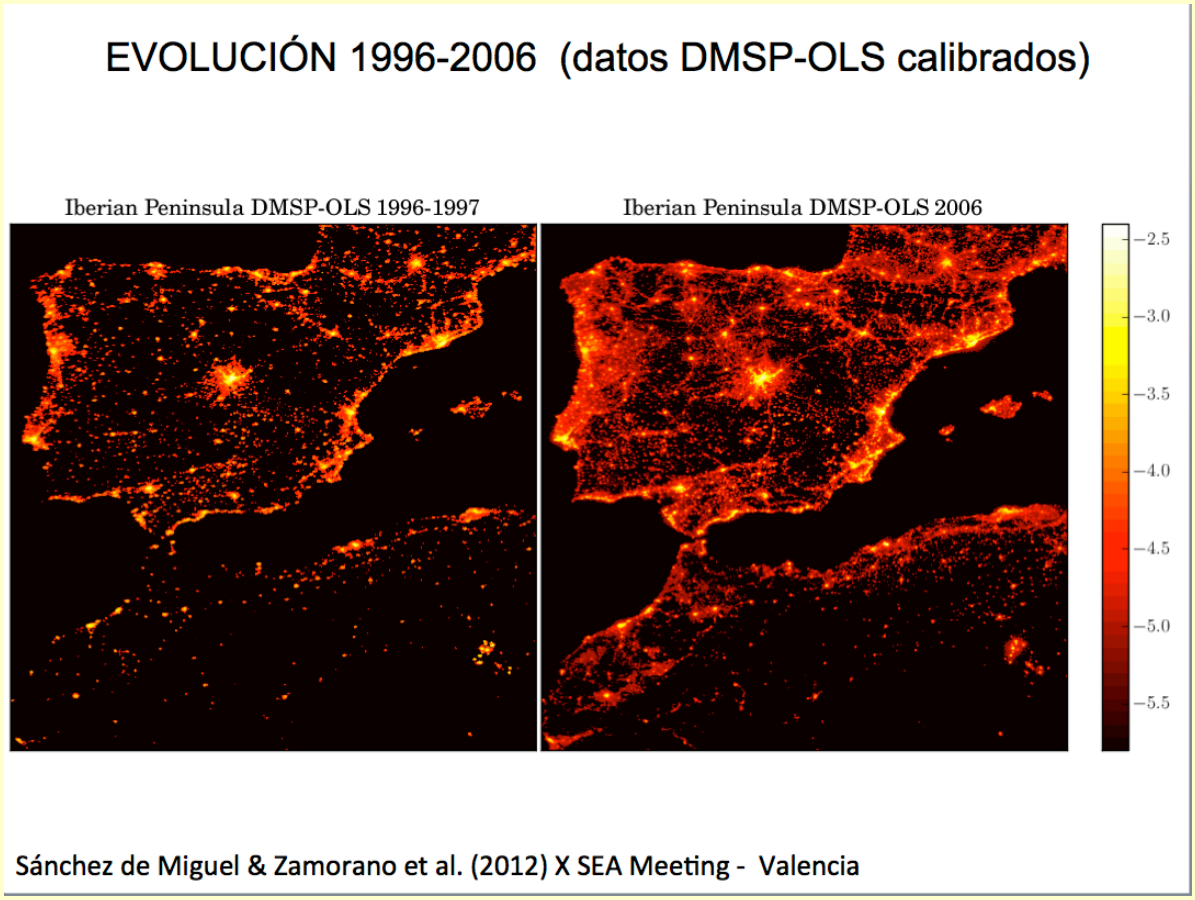
La forma más precisa de medición de la contaminación lumínica se realiza mediante técnicas de fotometría. Consiste en observar una serie de estrellas de referencia (el Catálogo de Estrellas Landolt es de los más usados) cuyo brillo es conocido y además es muy estable. Midiendo el brillo de diferentes estrellas a determinadas alturas podemos hacer una calibración de nuestra cámara para el estado de la atmósfera en ese instante. Después sólo tenemos que apuntar a la zona que queramos medir y podremos obtener el brillo del fondo del cielo. Este método es el más preciso, pero también el más laborioso. Además no sirve cualquier cámara, hay que usar un filtro específico para fotometría, una montura que compense el movimiento del cielo durante la toma de fotografías, etc, con lo cual el desembolso en material es considerable.

Desde hace unos años existe también un pequeño dispositivo que permite hacer mediciones rápidas y con la suficiente precisión para medir la evolución de la contaminación lumínica. Se trata del Sky Quality Meter [http://www.unihedron.com/projects/darksky/].

Con apuntar al cenit y apretar un botón el SQM realizará unas medidas durante unos segundos y nos mostrará el brillo del cielo en magnitudes por segundo de arco cuadrado. Esta unidad de medida puede ser transformada a magnitud límite visual mediante diferentes modelos de conversión [http://www.meridi.es/2011/01/comparativa-de-modelos-de-conversion-de-magnitudes/].

Además, la tecnología avanza y últimamente hay aplicaciones para teléfonos móviles (determinados iPhone) como la denominada Dark Sky Meter [http://www.darkskymeter.com], que mediante la cámara de fotos del teléfono puede hacer una estimación bastante aproximada de la contaminación lumínica.

Existen trabajos más elaborados sobre la evolución de la contaminación lumínica basados en fotografías por satélite. Como los realizados por Alejandro Sánchez, Jaime Zamorano y otros, de la Universidad Complutense de Madrid. Mediante la calibración de imágenes por satélite, como los satelites meteorológicos del Departamento de Defensa de EEUU (DMSP), pueden comparar la evolución de la contaminación lumínica a lo largo de los últimos años.



En definitiva, el mayor problema en la lucha contra la contaminación lumínica es desprendernos del miedo ancestral a la oscuridad, comprender que ésta no sólo no es un problema si no que es una necesidad. Y que donde haga falta luz, se puede proporcionar sin apenas contaminar. Las administraciones por su parte se tienen que implicar más en la lucha contra la contaminación lumínica, no basta con legislar sobre una cuestión si te desentiendes del control de su cumplimiento.

Por nuestra parte siempre podemos tratar de registrar objetivamente la calidad del cielo mientras lo disfrutamos; quizás en el fondo somos unos afortunados y en el futuro nuestros nietos pasen por la vida sin contemplar un cielo plagado de estrellas, todavía a nuestro alcance en algunas privilegiadas zonas.

La iluminación de los túneles es un caso especial en el que se aumenta la cantidad de focos a la entrada y a la salida para reducir el deslumbramiento de los conductores. De día deberían encenderse la gran mayoría de los focos. De noche sólo se dejan encendidos unos pocos para igualar la iluminación a la del exterior. En la foto el tunel de la Avenida de Salamanca en Valladolid. Dispone de 78 focos en 110 metros de longitud de los que sólo se encienden 12, tanto de día como de noche.

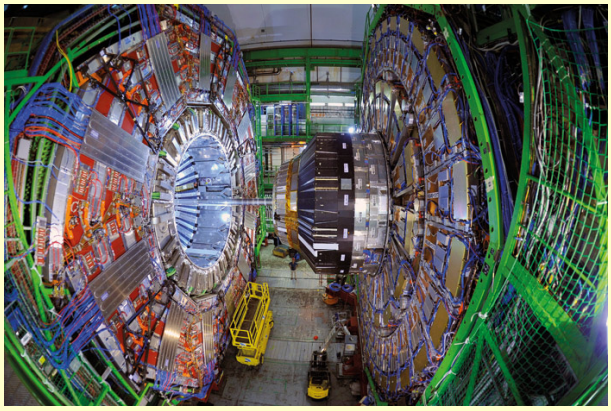
Visitando el CERN

Abel Calle
Presidente de la Sección de Física. Universidad de Valladolid

Durante los dos días que se celebró la jornada de "puertas abiertas" en el CERN, el pasado mes de septiembre, la Sección de Física organizó una visita académica de los alumnos del Grado en Física; la coincidencia del evento con el anuncio del Nobel de Física de este año ha sido oportuna para propiciar el conocimiento de los grandes centros de investigación en el entorno académico.

El pasado día 8 de octubre se daban a conocer los nombres de los ganadores del premio Nobel de Física 2013: Peter Higgs (Univ. de Edimburgo) y Francois Englert (Univ. Libre de Bruselas), por haber postulado teóricamente, en 1964, la existencia de la partícula que consolida el modelo estándar de la Física de partículas, y que ha sido recientemente descubierta en el CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*). Pocas veces en la historia un Nobel ha sido tan esperado y, por ello, poco sorprendente. La difusión mediática del conocido como "bosón de Higgs" ha traspasado todas las previsiones ya que ha sido, durante los dos últimos años motivo de conversación en los más diversos ambientes sociales. Cierto que mejor el apelativo de "bosón de Higgs" que la desafortunada traducción de "partícula divina" que, a su vez, fue malinterpretada por el editor del libro de Leon Lederman (también nobel de Física en 1988). En todo caso uno se pregunta cómo es posible que un descubrimiento científico, tan difícil de entender incluso por los Físicos no especializados, haya tenido semejante repercusión social. A ello habrá contribuido, a buen seguro, la magnitud de las instalaciones que han sido necesarias para preparar el experimento, entre otros, que dio lugar al descubrimiento de la, tan esperada, partícula. Un túnel, de 27 km de circunferencia, ubicado a 100 metros bajo tierra, entre la frontera de Francia y Suiza, requiriendo condiciones de temperatura de –270ºC en condiciones de vacío es una descripción que sorprende a cualquier persona.

El CERN lleva funcionando desde 1952 y existen varios aceleradores de partículas y otros experimentos que son un verdadero placer para cualquier físico e ingeniero; sin embargo ha sido la puesta en funcionamiento del LHC (*Large Hadron Colider*) la que ha llevado a la sociedad el conocimiento de estos temas.



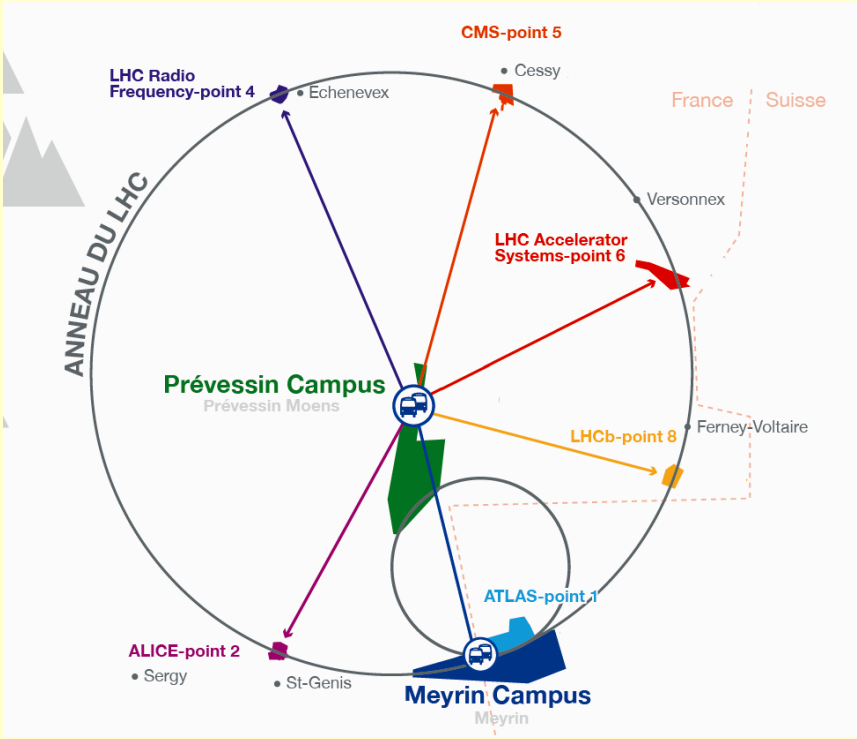
Detector CMS ubicado a lo largo del LHC y donde tuvo lugar, junto con ATLAS, la detección del bosón de Higgs

El CERN celebra sesiones de "puertas abiertas" en periodos de varios años y este año, probablemente animado por el Nobel que se veía venir, han abierto sus laboratorios durante los días 28 y 29 de septiembre, y aprovechando el acontecimiento la Sección de Física de la Universidad de Valladolid ha organizado una visita académica a sus instalaciones, de un numeroso grupo de alumnos del Grado en Física.

La organización del CERN para desarrollar este evento es digna de elogio. Todos los laboratorios fueron abiertos al público, y se realizaron explicaciones de funcionamiento, requisitos, objetivos, etc. El personal a cargo de las actividades fueron los propios científicos trabajadores del centro y, en su mayoría, voluntarios. Explicaciones aseguradas en francés e inglés y eventualmente, italiano, español o alemán.

Revista de Ciencias, 3, 43-45, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

Por otra parte, no es fácil organizar la intendencia de un evento que visitan miles de personas ajenas a sus instalaciones, con dos campus repletos de laboratorios distribuidos en un círculo de 4 km de radio. Antes he mencionado un dato que no parecía tener mucho interés: se encuentra ubicado entre las fronteras de dos países, uno de los cuales ni siquiera pertenece a la UE; no es extraño salir de un laboratorio francés y entrar en una cafetería suiza donde tienes que cambiar de moneda para tomar un café o cruzar las aduanas cuando realizas un desplazamiento entre diferentes edificios. Sin embargo la visita, ayudada de mapas y ubicaciones de los laboratorios, resulta eficiente y precisa.

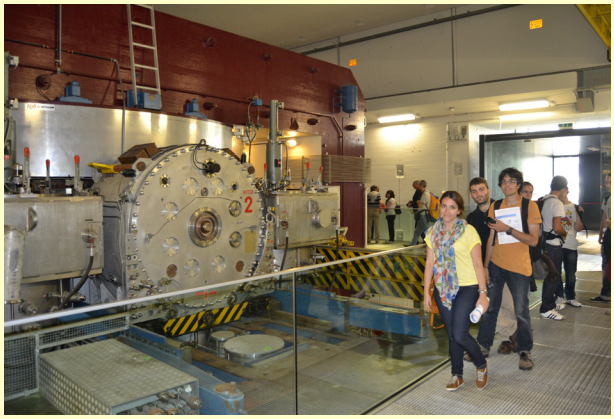


El CERN se encuentra distribuido en los campus de *Meyrin*, dividido por la frontera y el que engloba la mayor parte de los laboratorios. Corresponde a los edificios donde se comenzaron las instalaciones, en los años 50 y que alberga el emblemático e histórico sincrotón, además de los laboratorios de superconductividad y criogenia. Por otra parte se encuentra el campus de *Prévessin*, ubicado próximo al centro del anillo principal del LHC, en territorio francés y con instalaciones más nuevas, como el centro de control del experimento AMS instalado en la Estación Espacial Internacional. Y luego, están los experimentos donde tienen lugar los análisis de detección de las partículas producto de las colisiones, como los CMS (*Compact Muon Solenoid*) y ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) que protagonizaron los experimentos de detección del bosón de Higgs, el ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*), LHCb y por supuesto los puntos en los que se producen las aceleraciones de partículas y la división en haces de colisión: *LHC-Radio_Frequency* y *LHC-Accelerator-Systems*. Estos 6 puntos se encuentran a 100 metros bajo tierra y forman parte del anillo principal del LHC, de 4 km de radio

Los alumnos y profesores de la Universidad de Valladolid han podido asistir a las explicaciones de los técnicos de los laboratorios de criogenia, donde se preparan los electroimanes del gran colisionador LHC, de superconductividad, el famoso e histórico sincrotón con el que el CERN inició sus actividades investigadoras, aceleradores de partículas de materia y antimateria operativos y en construcción, conferencias especializadas. Además de las visitas a los laboratorios y experimentos de superficie.

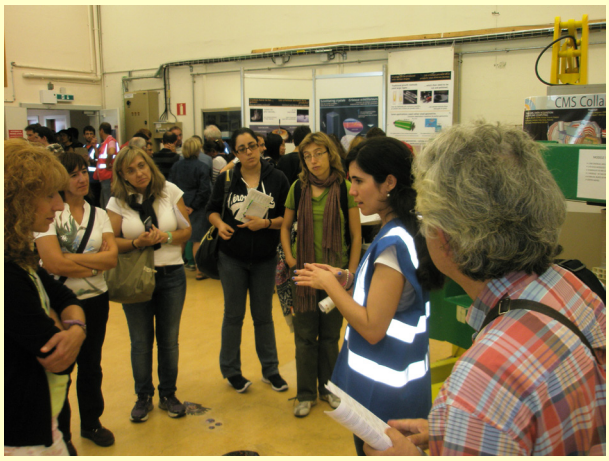
En las salas de conferencias se pudo asistir a encuentros con los científicos más relevantes del CERN.

Para concluir con una apreciación global de la visita académica organizada debemos destacar que la visita al CERN de la Sección de Física ha tenido varios puntos de interés académico. En primer lugar las características propias de sus instalaciones lo convierten en una de las mayores instalaciones tecnológicas de la historia, quizás comparable en su magnitud e internacionalización a la propia construcción de la Estación Espacial Internacional, con la que colabora, por cierto. Por otra parte la contribución de todas las explicaciones de los laboratorios ha constituido para los alumnos la posibilidad de interactuar en un medio que no siempre se encuentra a las clases prácticas de la Universidad, como es el caso de la superconductividad, criogenia o las salas de control de experimentos de radiación de alta energía en medios espaciales.



En el laboratorio del mítico *sincrotón*, pionero en los comienzos de funcionamiento del CERN en los años 50

Y finalmente, y quizás la más importante, el encuentro con investigadores que se encuentran en el CERN en estancias de doctorado o becas de investigación; de hecho uno de los contactos de nuestra sección en el CERN era una antigua alumna en fase de doctorado. Trabajar en el CERN es posible, al menos si los recortes en materia de investigación no se traducen en suprimir las cuotas de contribución al CERN o a la ESA.

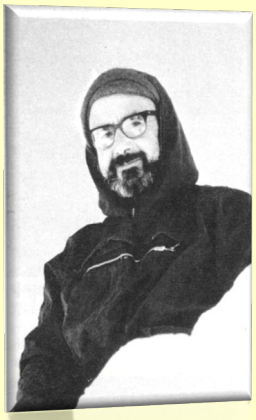


Laboratorio de cristales. Se mostraros los cristales centelleantes, tan pesados como el plomo y tan transparentes como el cristal y emiten luz. Se utilizan en los sistemas de detectores de partículas y en aplicaciones médicas.

Para saber más

http://www.cern.org

Alumnos y profesores de la Sección de Física de la UVa frente al lago Leman, en Ginebra

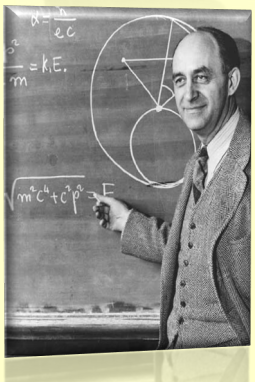


Si hay vida en Marte debemos buscarla y encontrarla; y si no hay vida, debemos saber explicar por qué

Wolf V. Vishniac , microbiólogo misiones Viking (1922 –1973)

Defiende tu derecho a pensar, porque incluso pensar de manera errónea es mejor que no pensar

Hipatia (370-415 a. C.)

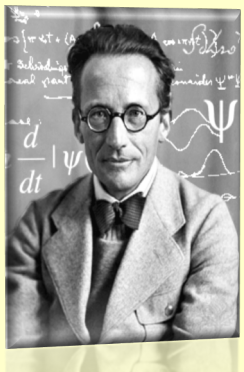


Solamente hay dos opciones: Si el resultado confirma la hipótesis, has hecho una medición. Si el resultado es contrario a la hipótesis, entonces has hecho un descubrimiento

Enrico Fermi (1901-1954)

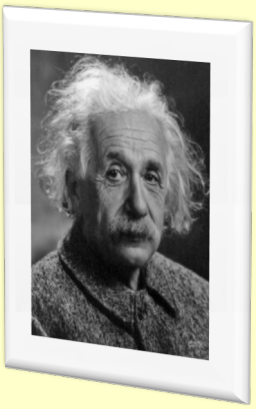
Las ciencias están todas entrelazadas entre sí: es mucho más fácil aprenderlas todas juntas a la vez que separar una de las otras

René Descartes (1596-1650)



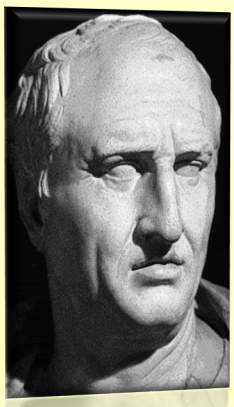
Un organismo debe tener un tamaño comparativamente grande para poder beneficiarse de leyes relativamente exactas.

Erwin Schrödinger (1887-1961)



Cuando me preguntaron sobre algún arma capaz de contrarrestar el poder de la bomba atómica yo sugerí la mejor de todas: La paz.

Albert Einstein (1879-1955)



Si quieres aprender, enseña.

Cicerón (106-43 aC)

Si tu experimento necesita estadística, hubiera sido necesario hacer un experimento mejor

Ernest Rutherford(1871-1937)

Revista de Ciencias

Universidad de Valladolid

Revista de Ciencias
Número 3
Noviembre 2013

Facultad de Ciencias. Paseo de Belén, 7, 47011-Valladolid
Universidad de Valladolid