# Revista de Ciencias

## Facultad de Ciencias

*Universidad de Valladolid*

**Número 2. Junio, 2013**

Universidad de Valladolid

# Revista de Ciencias

## Índice de artículos


| | Página |
|---|---|
| Editorial | 3 |
| Nanotecnología: máquinas moleculares o cómo hacer que algo se mueva cuando tú quieres<br>por Celedonio M. Álvarez y Héctor Barbero | 5 |
| Patentes, punto de unión entre la ciencia, la técnica y el derecho<br>por Pablo González Arias | 13 |
| La percepción acústica: Física de la audición<br>por Jesús Mariano Merino y Loida Muñoz-Repiso | 19 |
| Descubriendo pifias científicas en el cine<br>por Alfonso Jesús Población Sáez | 27 |
| Las lunas de Júpiter<br>por Daniel Camarero Muñoz | 35 |
| Curiosidades atmosféricas de Saturno<br>por Víctor Manuel González | 41 |
| Cosmonoticias: pequeño saltamontes<br>por Juan Carbajo | 43 |



http://www.cie.uva.es/revista_ciencias
ISSN: 2255-5943



**Número 2. Junio, 2013**

# Editorial

El número 2 de la **Revista de Ciencias** sale en Junio de 2013 coincidiendo cronológicamente con el final del curso académico 2012/13 y esperamos, con el siguiente número, dar la bienvenida al 2013/14 para mantener la periodicidad de 3-4 meses. Por otra parte, el contenido de este número es muy representativo del carácter con el que se está consolidando la publicación; cada uno de los artículos representa, respectivamente, la actualidad tecnológica, la gestión internacional de los resultados científicos a través de patentes, el reconocimiento académico, la amenidad en la divulgación y la presencia de los grupos universitarios de alumnos.

La nanotecnología es uno de los campos actuales que presenta mayor innovación e interés, por su aplicación a herramientas que nos facilitan el trabajo y la vida cotidiana. El término nanotecnología nos sugiere la investigación de "lo pequeño" aunque presenta una gran diversificación. El artículo "*Nanotecnología: máquinas moleculares o cómo hacer que algo se mueva cuando tú quieres"* pretende presentar una explicación a través de una de sus líneas: la síntesis de máquinas moleculares.

El ingeniero ferroviario burgalés José Luis López Gómez ha conseguido el premio como mejor inventor industrial del año 2013 que otorga la Oficina Europea de Patentes (EPO). Este importante acontecimiento coincide en el tiempo con la celebración, en 2013, del cuadragésimo aniversario de la conferencia diplomática establecida a tal fin y que dio luz a la firma de la Convención Europea de Patentes como texto jurídico común aplicable en materia de patentes. Ambos acontecimientos justifican lo oportuno de explicar cómo funciona el protocolo de obtención de patentes; lo que debería ser el objetivo de la investigación tecnológica. El artículo *"Patentes, punto de unión entre la ciencia, la técnica y el derecho"* ha sido elaborado por un examinador de patentes en la Oficina Europea de Berlín y conjuga la contextualización histórica, la explicación del procedimiento de obtención de patentes y plantea algunas matizaciones acerca del tratamiento del software en la gestión de patentes.

La Acústica es una rama de la Física cuya presencia académica en los planes de estudio es muy diversa; aparece en titulaciones con marcado carácter aplicado –como el caso de Arquitectura–, aunque también en el ámbito de las Ingenierías se reclama el conocimiento básico del tratamiento de la intensidad acústica. Aprovechando las ventajas de una revista digital, en este número se presenta el artículo "*La percepción acústica: Física de la audición*", con un marcado carácter didáctico y con el apoyo de 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.

Desde una perspectiva estrictamente científica, el Museo de la Ciencia de Valladolid programó, por tercer año consecutivo, un ciclo de conferencias bajo el título "Increíble, pero falso" tratando de analizar aquellas incorrecciones que existen en el tratamiento de hechos científicos por parte de los medios de comunicación. El ciclo se cerraba con una charla en la que se abordaban algunas falacias que contemplamos con naturalidad en el cine, pero que no por ello dejan de ser absolutos disparates; ésta es la temática abordada por el artículo *"Descubriendo pifias científicas en el cine"*, mezcla de divulgación de las matemáticas y de entretenimiento reflexivo.

El Grupo Universitario de Astronomía (GUA), ubicado en la Facultad de Ciencias tiene un apartado habitual en el que algunos de sus miembros y alumnos de la Sección de Física publican sus contribuciones. El artículo "*Las lunas de Júpiter"* no sólo es un recordatorio descriptivo de los satélites del mayor de los planetas del sistema solar, sino que muestra la actualidad en la exploración planetaria. Los descubrimientos realizados por la sonda Galileo en Europa (luna galileana), donde descubrió evidencias de océanos de agua bajo la superficie helada, han cambiado

*Revista de Ciencias*, 2, 3-4, junio 2013
ISSN: 2255-5943

la percepción de cuáles son los objetos del sistema solar más interesantes en el desarrollo de nuevas misiones, como la misión JUICE de la ESA que explorará estas lunas en el futuro. Completan la aportación del GUA una noticia tecnológica y algunas peculiaridades de la atmósfera de Saturno descubiertas recientemente por la sonda Cassini.

La Revista de Ciencias se está consolidando en cada número. En el presente estrenamos ISSN para que los autores tengan catalogadas sus contribuciones. Además se encuentra indexada en Dialnet para tener mayor difusión y aprovechar algunas de las ventajas de este sistema como la alerta de aparición de nuevos números. Finalmente cabe destacar la reciente aprobación, por parte de la Universidad de Valladolid, del reconocimiento académico a los alumnos por su contribución en forma de artículos, enmarcado dentro de los programas de "Otras actividades" ofertado desde la Facultad de Ciencias y que tendrá validez a partir del próximo curso académico. Todos estos aspectos hacen más atractivo, si cabe, la labor de la divulgación científica y desde este apartado editorial os invitamos a tomar parte activa.

**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

# Nanotecnología: máquinas moleculares o cómo hacer que algo se mueva cuando tú quieres

**Celedonio M. Álvarez y Héctor Barbero**
Área de Química Inorgánica. Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid

La nanotecnología ha irrumpido en los centros de investigación de una manera impresionante en los últimos años. Parece útil y necesario el tener una noción sobre qué es y qué puede esperarse en un futuro de esta nueva rama de la tecnología. Para ello se ha utilizado, a modo de guía, uno de los campos dentro de la nanotecnología: la síntesis de máquinas moleculares.

## Introducción

Desde tiempos inmemoriales la humanidad se ha centrado en la observación del cielo y todo lo que en él ocurría. Se han desarrollado una amplia gama de telescopios para poder acercarnos lo más posible a ese espacio tan inmenso. Gracias a esto, cuanto más hemos ido sabiendo y entendiendo lo que ocurre en el Universo, más grande nos parece. Así, el estudio del Universo ha interesado a la humanidad por diversas razones a lo largo de toda la historia. Una de ellas era el intento de comprender lo que en él sucedía para poder mejorar la calidad de vida a través de la optimización de la agricultura y la ganadería, la seguridad de los viajes y el comercio y la comprensión de los distintos problemas climáticos que los harían predecibles asegurando así nuestras vidas.

En el otro extremo de la escala se encuentra el mundo de lo más pequeño. De hecho, tan pequeño que para nosotros es invisible. Sólo somos capaces de observar y medir propiedades macroscópicas de esa escala tan diminuta. Con el desarrollo de los diferentes tipos de microscopios que actualmente se utilizan se ha podido descubrir un mundo fascinante lleno de células, virus, moléculas grandes y pequeñas e incluso átomos, el cual, ha resultado ser tan infinito e interesante como el propio Universo aunque al ser tan pequeño nos hace todavía más difícil imaginarlo y comprenderlo. Por eso, en los últimos años, gran parte del poder científico se ha centrado en el estudio de lo más pequeño [1].

*Revista de Ciencias*, 2, 5-12, junio 2013
ISSN: 2255-5943

**Figura 1**: Relación de tamaños entre el mundo molecular y el Universo.

¿Cómo visualizar esta diferencia de tamaños? ¿Cómo relacionar en nuestra mente el universo y las moléculas? La figura 1 muestra tres cuerpos esféricos (o casi) que, aunque parecidos en forma, son absolutamente diferentes en magnitud. Un balón, que es un objeto que conocemos y somos capaces de apreciar su tamaño, es 100.000.000 ($10^8$) veces mayor que el fullereno, un alótropo del carbono formado por 60 átomos de este elemento. A su vez, ese mismo balón es 100.000.000 ($10^8$) veces más pequeño que la Tierra. De este modo se pone de manifiesto que la escala universal, que representa la Tierra, y la escala molecular, que representa el fullereno, se diferencian nada menos que en 16 órdenes de magnitud ($10^{16}$).

## Nanociencia y nanotecnología

El estudio de este mundo pequeño ha dado lugar a acuñar nuevas palabras como nanociencia y nanotecnología. El prefijo nano unido a estos vocablos encaja perfectamente en el uso que se les da por dos razones. En primer lugar, el origen de este prefijo, que proviene del término $\nu\alpha\nu o\sigma$

griego, que significa diminuto, enano o pequeño y que indica a qué se van a dedicar de forma clara estas ramas de la ciencia y de la tecnología. Por otro lado, un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro ($10^{-9}$ m), estando el nanómetro en el intervalo de tamaños estudiado por esta rama de la ciencia. Dicho intervalo se encuentra entre 0,1 nm y 100 nm aproximadamente. Esta escala de tamaños es un tanto arbitraria. El límite inferior lo marca el tamaño que presentan los átomos que serán los objetos más pequeños que se pueden manipular. Por otro lado, el límite superior es una cifra para indicar que los objetos deben tener un tamaño por debajo de la micra ($10^{-6}$ m).

De manera general, la nanociencia podría definirse como la ciencia que estudia los nuevos conceptos y propiedades (físicas, químicas, biológicas, mecánicas, eléctricas...) que surgen como consecuencia de la escala del nanómetro (de 0,1 a 100 nanómetros, del átomo hasta por debajo de la célula). Y se podría definir nanotecnología como la fabricación de materiales, estructuras, dispositivos y sistemas funcionales a través del control y ensamblado de la materia a esta escala tan reducida.

El estudio de este tipo de intervalo de tamaños no nos es desconocido. La química lleva estudiándolo los últimos 200 años, desde la introducción del concepto de átomo moderno por John Dalton a principios del siglo XIX. La diferencia existente entre la química y la nanociencia es entonces el enfoque de la investigación y no los objetos estudiados. Por un lado, la química obtiene información atómica y molecular del estudio de propiedades macroscópicas de la materia como cambios de color, pH, temperatura, propiedades espectroscópicas, etc. Por otro lado, la nanociencia estudia este intervalo de tamaños de forma individualizada, manipulando, entendiendo y actuando sobre un único átomo, molécula o partícula. Aunque diferentes, de hecho, muchas de las técnicas utilizadas por los científicos dedicados a esta nueva rama de la ciencia son las que tradicionalmente han utilizado los químicos a lo largo de los años.

## La miniaturización

La tecnología actual intenta miniaturizar prácticamente todo tipo de dispositivos. De este modo, los ordenadores, reproductores de música y en general todos los productos electrónicos son un ejemplo de ello. Se ha ido disminuyendo el tamaño de los circuitos integrados de los que están compuestos, de tal manera, que parece que no exista un tamaño mínimo. La realidad contradice esta afirmación. Tres son las razones que hacen que sí exista límite a esta miniaturización. La más obvia, y no por ello menos importante, es la de que en algún momento no puedan realizarse herramientas tan pequeñas como para poder manipular y modelar las partes de esos dispositivos. En segundo lugar, al ir disminuyendo el tamaño de esas piezas, la relación entre la superficie y su volumen se verá incrementada de manera muy importante y las propiedades de un material que macroscópicamente son muy concretas y conocidas variarán de forma drástica. Esto se conoce como "efecto del tamaño finito". Por último, y quizás el más importante de los problemas que se encontrará la miniaturización, sea que lo que son certezas en el mundo macroscópico se convierten en probabilidades en el microscópico. En nuestra escala las ecuaciones de Newton definen el movimiento de los cuerpos, las de Maxwell la radiación electromagnética y la ley de Ohm, la electricidad. En estos tamaños la mecánica cuántica se pone de manifiesto variando completamente la forma en que se estudian y manipulan estos dispositivos.

Dos son los posibles acercamientos a la miniaturización. Por un lado lo que se conoce como fabricación descendente o "top-down" (de arriba abajo) [2]. Puede entenderse como la que utiliza un escultor que de una pieza de cierto material va eliminando trozos de tal manera que al final se encuentra con una pieza más pequeña que el bloque inicial con la forma adecuada. El otro sistema de fabricación es el ascendente o "bottom-up" (de abajo a arriba) [2]. Este método es el de un albañil que ladrillo a ladrillo va construyendo una pared, también con la forma requerida. Esta aproximación utiliza para construir los diferentes dispositivos componentes básicos muy variados tales como átomos, ácidos nucleicos, proteínas, nanopartículas o nanotubos. Esto, que parece muy difícil, ha podido ser logrado utilizando la punta de un microscopio SEM (scanning electron microscope) de tal manera que se pueden colocar de uno en uno átomos o moléculas para formar palabras o logotipos, o incluso fotogramas de una nanopelícula [3] (figura 2).

Centrándonos en la construcción de dispositivos a tamaño nanométrico sería posible ir construyéndolos átomo a átomo pero la escala temporal que nos haría falta nos lo impide. Ya se conocen robots que colocan átomos de Si ordenadamente a una velocidad de 7 minutos por átomo. Así, para construir una máquina molecular de unos 50 átomos se tardaría unas 6 horas. ¿Cuánto tardaría en fabricar un *μmol* de este motor molecular? Queda claro que la aproximación bottom-up esta fuera de la realidad a la hora de realizar dispositivos que tengan alguna utilidad macroscópica. Entonces, ¿cómo haremos para sintetizarlos? Utilizaremos lo que se denomina autoensamblaje, la tendencia que exhiben ciertas

moléculas para autoorganizarse según patrones regulares a escala nanométrica. Este autoensamblaje puede deberse a la formación de nuevos enlaces covalentes, muy energéticos (125-900 kJ/mol), o enlaces supramoleculares, más débiles (0,1-40 kJ/mol). Cuando estos procesos se producen de manera repetitiva se forman agregados moleculares de gran complejidad. Estos mecanismos suponen la generación de una estructura supramolecular a partir de la autoorganización y autoensamblaje de ciertas "unidades básicas" (una sola molécula o más de una molécula), que al reconocerse entre sí, lo que se conoce como reconocimiento molecular, se unen de manera espontánea formando arquitecturas nanométricas complejas.

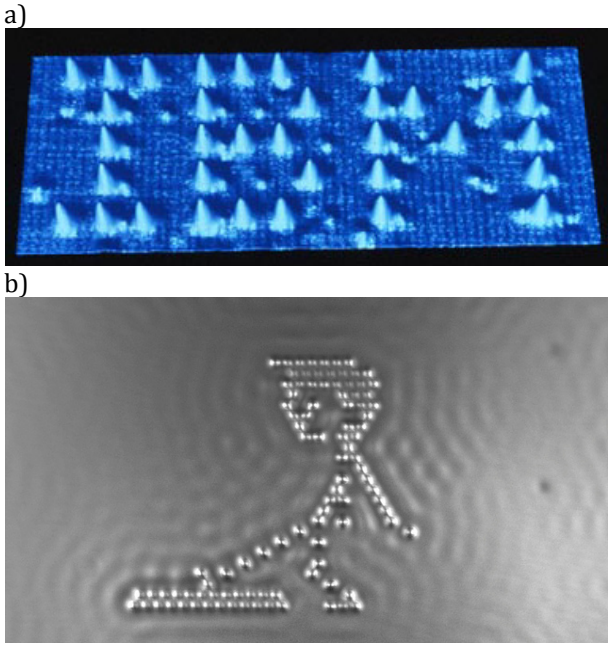



**Figura 2**: a) Átomos de Xe sobre una placa de Ni. b) Fotograma de la nanopelícula "A Boy And His Atom". Moléculas de CO sobre una placa de Cu (Cortesía de IBM).

## Máquinas moleculares

Dentro de las posibles moléculas o materiales a sintetizar mediante este método existe una familia que atrae de forma especial la atención, son las denominadas máquinas moleculares. Se puede definir máquina molecular como "un sistema molecular en el que el movimiento controlado de un componente del sistema con respecto al resto, provocado por un estímulo externo, permite el desarrollo de una función específica". De este modo, las características que han de tener estas moléculas o agregados moleculares son: que podemos controlar cierto movimiento relativo de partes de la molécula a voluntad, y que ese movimiento pueda traducirse en algo potencialmente útil [4].

Varios tipos de máquinas moleculares han sido desarrolladas, siendo dos las categorías en que se pueden subdividir. Por un lado tenemos los dispositivos donde se controla el movimiento a través de enlaces covalentes, y por otro, el control de movimiento de moléculas entrelazadas mecánicamente.

***Dispositivos donde se controla el movimiento a través de enlaces covalentes***

Veamos varios ejemplos para entender a qué nos referimos con controlar el movimiento a través de enlaces covalentes. El primer ejemplo es en el que se controla el giro de un enlace sencillo C-C. El compuesto orgánico que aparece en la figura 3 está formado por un tripticeno al que se le ha unido una bipiridina que al reaccionar con un átomo de mercurio se frena el giro de uno de los enlaces C-C. [5]. Al añadir un compuesto capturador de mercurio como el EDTA se quita ese freno y gira libremente de nuevo.

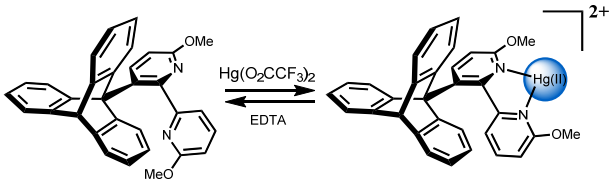



**Figura 3**: Freno molecular inducido por la coordinación de un ion molecular. EDTA = etilendiaminatetraacetato.

El frenado de un giro también puede realizarse en enlaces de coordinación. Es bien conocido que los ligandos ciclopentadienilo en el ferroceno y sus derivados giran libremente. En el ejemplo que aparece en la figura 4, donde cada uno de los ligandos se encuentra funcionalizado por un grupo ácido, al desprotonar ambas funciones se mantiene ese giro libre de los enlaces Fe-C; pero, si se produce la protonación de una de las funciones, se forman enlaces de hidrógeno que frenan ese giro. Al volver a eliminar ese protón el giro se regenera [6].

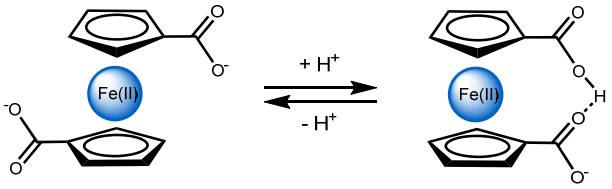



**Figura 4**: Freno molecular de los ligandos ciclopentadienilo de un ferroceno sustituido por cambio de pH.

Estos cambios conformacionales no tienen por qué deberse a la incorporación de otra molécula, pueden ser inducidos por procesos de oxidación - reducción. En el ejemplo de la figura 5 el estado en el que aparecen dos piridinas sustituidas se produce un autoensamblaje por interacción π-π con el macrociclo. Si se oxida se pierde esta interacción y el grupo naftaleno sale del hueco interno del macrociclo [7].

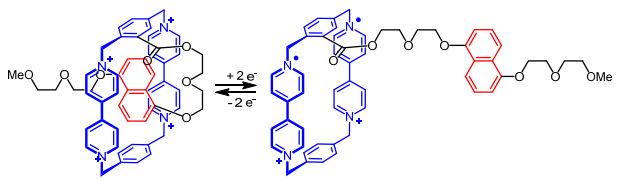



**Figura 5**: Cambio conformacional inducido electroquímicamente.

Otro ejemplo en el que se produce un cambio conformacional importante es el que se encuentra en la figura 6. Aquí, la coordinación de cinco átomos de plomo hace que la longitud de la cadena pase de 7,5 Å a 38 Å. Dependiendo del pH que tenga la disolución los átomos de plomo se coordinarán al compuesto o al criptato haciendo el cambio de longitud reversible [8].

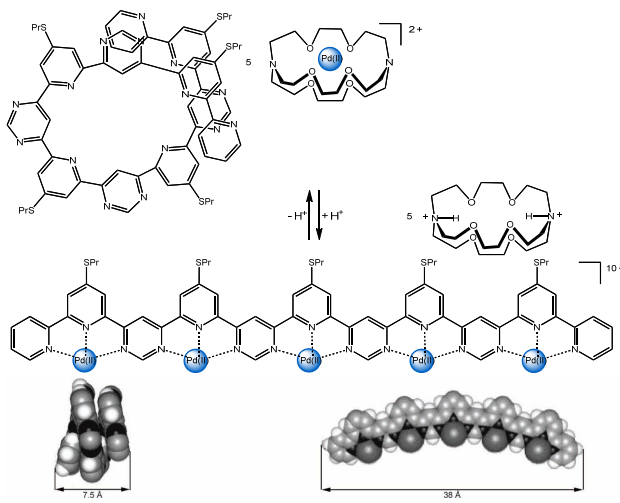



**Figura 6**: Cambio de longitud de un compuesto por coordinación de átomos de Pb al cambiar el pH. Los contraiones ($CF_3SO_3^-$) y el disolvente ($CH_3CN$), que completa la esfera de coordinación del Pb(II) se han omitido. Las estructuras de rayos X representadas han sido impresas con el permiso de la ref. [8].

Por último, otro de los cambios conformacionales tipo se debe a la variación de la disposición geométrica de *trans* a *cis* y viceversa de un grupo azobenceno. En el ejemplo de la figura 7 la isomerización *trans-cis* por irradiación con la adecuada frecuencia produce un cambio en el ángulo que forman los dos fenilos marcados en rojo. En la posición *trans* presentan un ángulo de 9º y en la posición *cis* en cambio es de 58º. Puede decirse que es una pinza o tijera molecular [9].

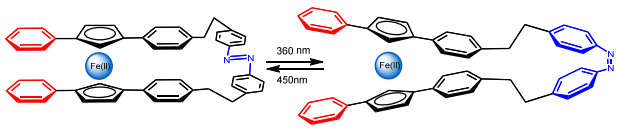



**Figura 7**: Fotoisomerización de un enlace N=N.

***Control de movimiento de moléculas entrelazadas mecánicamente***

Por otro lado tenemos otro tipo de máquinas moleculares donde tenemos al menos dos moléculas enlazadas mecánicamente. Esto quiere decir que, aunque no presentan enlace covalente entre ellas, no pueden separarse si no se disocia alguno de los enlaces covalentes que poseen. Los tipos de estas moléculas más estudiados son los catenanos y los rotaxanos (figura 8) [10].

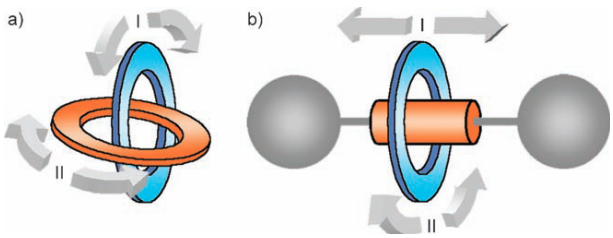



**Figura 8**: a) catenano y b) rotaxano. Las flechas indican los movimientos relativos: rotación y traslación.

Los catenanos son compuestos en la que al menos dos moléculas se encuentran enlazadas como si de eslabones de cadenas se tratase. En la figura 9 se presenta un ejemplo donde la coordinación de un átomo de cobre induce un cambio conformacional [11].

El grupo de moléculas entrelazadas mecánicamente más estudiado y que más aplicaciones ha permitido ha sido el de los rotaxanos [12]. Un rotaxano consiste en una molécula en forma de pesa que ha atravesado un macrociclo. Su nombre deriva del latín *rota* (rueda) y *axe* (eje). Dicha "rueda" se denomina así porque posee un movimiento libre de circumrotación. El eje tiene en sus extremos grupos muy voluminosos, llamados cierres, que suponen

una barrera estérica para el macrociclo e impiden el desenhebrado.

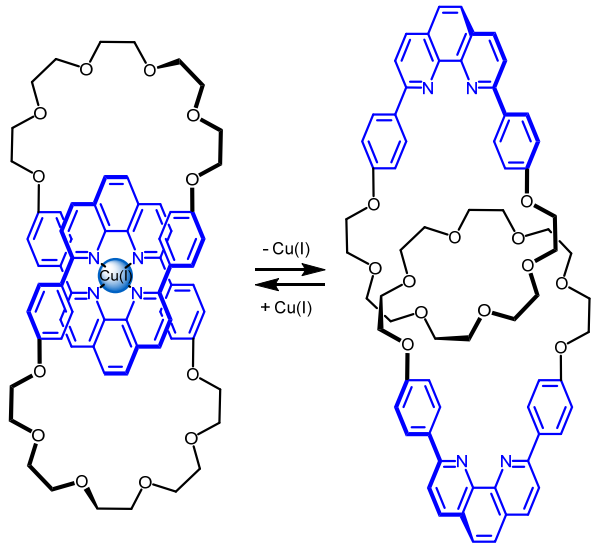



**Figura 9**: Cambio conformacional de un catenano por la adición de un ion metálico.

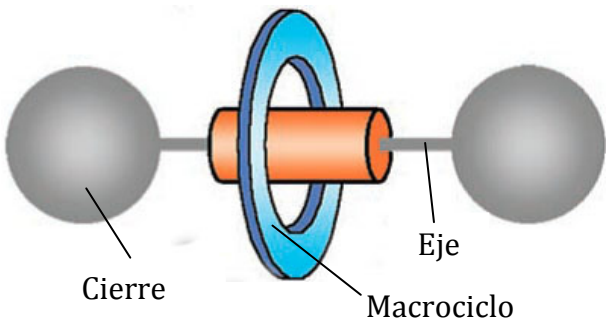



**Figura 10**: Partes de un [2]-rotaxano.

El motivo por el que el anillo se introduce en el eje no obedece a un simple movimiento caótico Browniano. Dicho eje posee en su estructura algún tipo de funcionalidad capaz de establecer una interacción intermolecular con el macrociclo de manera que se produce un autoensamblaje de las piezas para formar un pseudorotaxano (macrociclo + eje). Posteriormente se añaden los cierres para obtener el rotaxano propiamente dicho [13]. Muchas veces la interacción entre macrociclo y eje no es débil, sino que es un enlace de coordinación con un metal de transición que luego puede ser liberado o formar parte de la macromolécula [14].

Aunque la existencia en sí de este tipo de compuestos es interesante por si misma, no deja de ser una curiosidad académica ya que no posee utilidad práctica. Sin embargo, el eje del rotaxano puede poseer otros grupos funcionales a los que el macrociclo sea afín, pero en menor medida (figura 11). Si es posible modificar esta afinidad entre funcionalidades, comúnmente denominadas estaciones, de manera controlada, estamos en posesión de una lanzadera molecular; un compuesto multiestable que puede generar algún tipo de trabajo a escala nanométrica con un simple cambio en el medio.

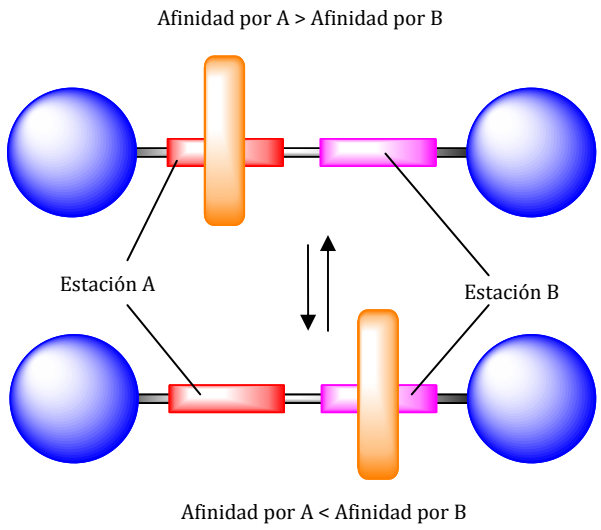



**Figura 11**: Funcionamiento de una lanzadera molecular de tipo [2]-rotaxano con 2 estaciones.

Existen varios tipos de ejemplos de estas lanzaderas. En la figura 12 se muestra el caso donde un proceso de oxidación-reducción Cu(I) / Cu(II) hace que ese átomo metálico cambie de posición en el eje, con lo que el resto de ligandos mecánicamente enlazados al eje también lo hagan [15].

Hay ejemplos en los que el comportamiento de una maquina molecular puede verse reflejado en el cambio de propiedades macroscópicas. El rotaxano que se observa en la figura 13 se ve activado por irradiación con luz UV. El macrociclo cambia de posición al isomerizarse el doble enlace de Z a E.

Si este rotaxano se deposita sobre una superficie, Au(111), al irradiar una zona de ésta se verá modificada su polaridad al dejar expuesta una zona muy fluorada de la molécula. Si sobre la superficie se coloca una gota de $CH_2I_2$ puede producirse el movimiento de esa gota (figura 14). Dicho de otra manera, al irradiar con luz UV una zona de la superficie se produce el cambio de polaridad que hace que varíe el ángulo de contacto de la gota produciéndose un movimiento neto sobre la superficie [16].

Este tipo de máquinas moleculares, las lanzaderas, son parte de la investigación que realizamos en nuestro grupo de investigación. En concreto, nos encontramos desarrollando lanzaderas moleculares donde una de las estaciones es una sal de amonio y la otra una sal de triazolinio (figura 15).

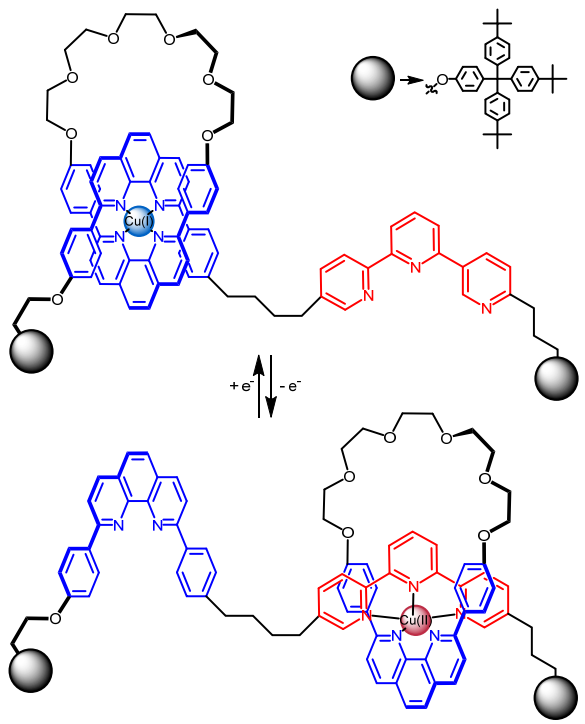



**Figura 12**: Lanzadera molecular que funciona con un estímulo redox.

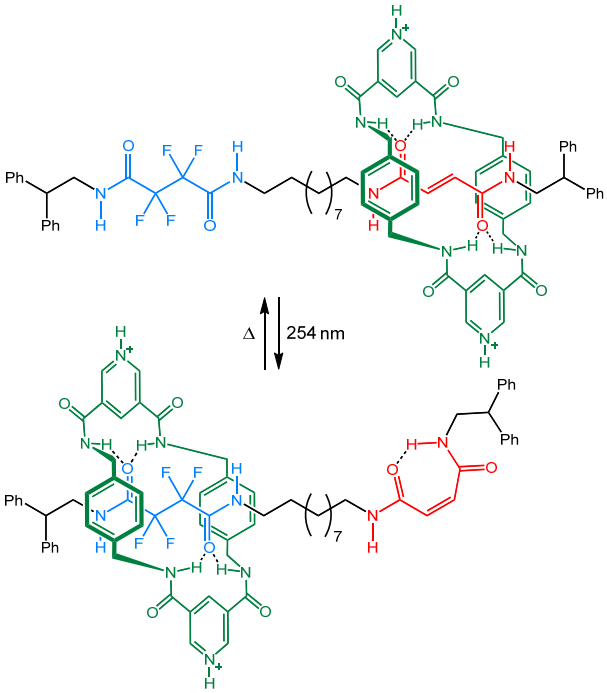



**Figura 13**: Lanzadera estimulada por irradiación UV.

Las sales de amonio son conocidas por presentar una gran afinidad por éteres corona a través de enlaces de hidrógeno. Al variar el pH, se forma la amina correspondiente que no tiene casi afinidad por el macrociclo. Si, como parte del eje, tenemos otra estación (sal de triazolinio) que presenta más afinidad que esa amina, se producirá el movimiento del éter corona a esta estación. Al variar de nuevo el pH y formar de nuevo la sal de amonio la mayor afinidad del macrociclo por esta sal que por la de triazolinio volverá a colocar al éter corona en su posición inicial [17].

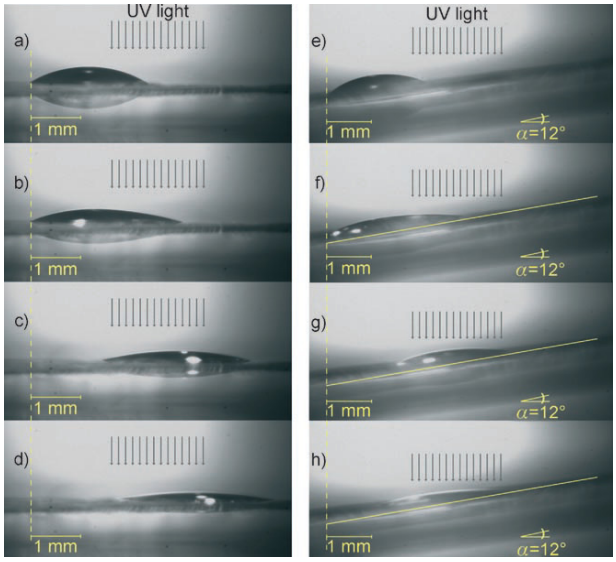



**Figura 14**: a) gota de $CH_2I_2$ (1,25 $\mu l$) sobre una superficie de Au(111) modificada con el rotaxano que aparece en la figura 13. Se indica la zona de irradiación con luz UV. b), c), y d) seguimiento del movimiento de la gota por la superficie. e), f), g) y h) igual que lo anterior pero en una pendiente inclinada un ángulo de 12º (fotografías cortesía de la referencia 16).

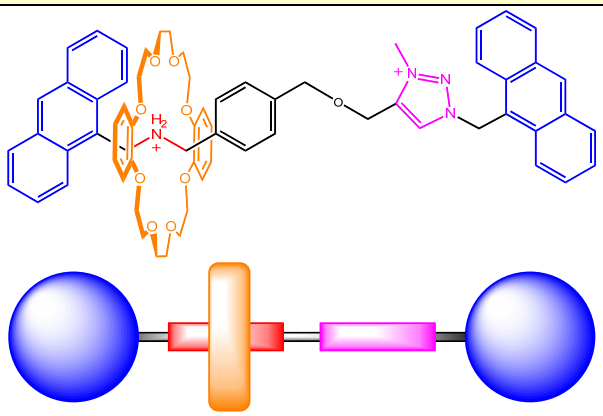


**Figura 15**: Lanzadera con dos estaciones sintetizada en nuestro grupo.

La primera aplicación en la que estamos trabajando radica en el control de reacciones catalíticas. Si una de las estaciones de la lanzadera molecular es un centro catalítico, sólo cuando está expuesto, sin el macrociclo a su alrededor, se convertirá en un catalizador (figura 16). De esta manera seríamos capaces de controlar la velocidad de una reacción a voluntad con un sencillo cambio en el medio, pH en nuestro caso.

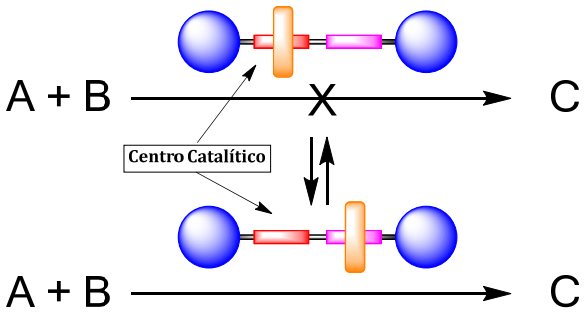



**Figura 16**: Catalizador conmutable y su actuación sobre una reacción.

Además de sintetizar estas lanzaderas catalíticas con un centro activo nos encontramos preparando otras donde hay 2 y 3 que podrían funcionar de forma sinérgica (figura 17).

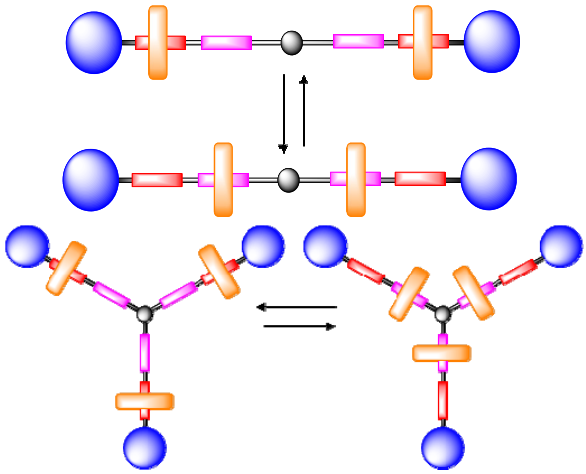


**Figura 17**: Funcionamiento de lanzaderas moleculares de tipo [3] y [4]-rotaxano preparadas en nuestro laboratorio con 2 y 3 sitios catalíticos.

Por otro lado, también preparamos lanzaderas que presentan una tercera funcionalidad que pueda variar su conformación con un estímulo externo (figura 18).

Es bien conocida la fotoisomerización del azobenceno, pasando de configuración *trans* (la más estable) a *cis* con irradiación UV de manera muy limpia y con un alto rendimiento (Figura 19). El proceso es reversible y puede obtenerse de nuevo el isómero *trans* con radiación de menor energía o térmicamente.

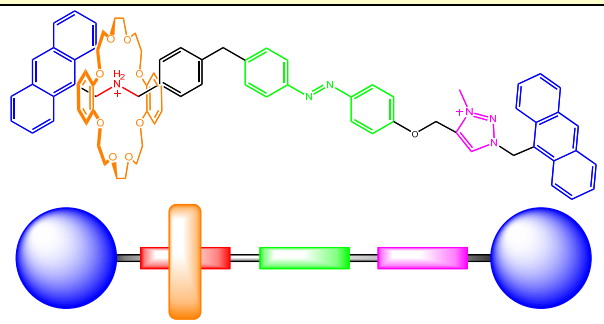


**Figura 18**: Lanzadera con tres funcionalidades.

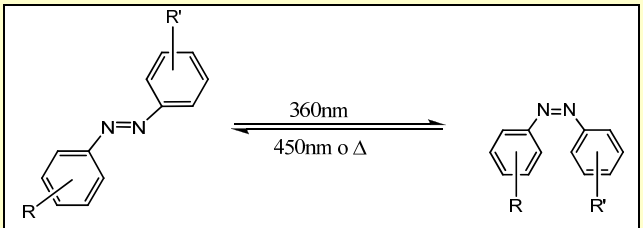



**Figura 19**: Fotoisomerización de derivados azobencénicos.

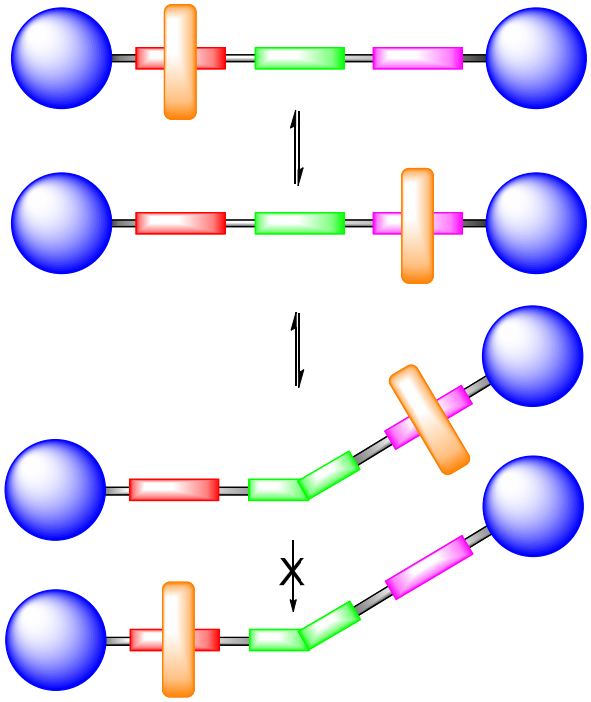


**Figura 20**: Comportamiento como interruptor lógico de la lanzadera con tres funcionalidades.

En resumen, la variación del pH del medio de reacción nos permitirá producir un movimiento dentro de la propia molécula entre dos puntos previamente definidos (figura 20). La irradiación a diferentes frecuencias nos permitirá decidir si nos interesa que este movimiento se produzca o no al variar la configuración del azobenceno de *trans* a *cis*. La combinación de estas condiciones del medio de reacción, irradiación y pH, nos permitirá obtener materiales que se comporten como interruptores lógicos de dos variables [19].

Además, dentro de este campo también desarrollamos nuevas nanomáquinas con el objetivo de que puedan operar en estado sólido, así como la inclusión de otras estaciones para conseguir movimientos conformacionales más variados, incluyendo complejos de coordinación con la finalidad de obtener mayor número de propiedades.

## Conclusiones

Como hemos visto, la nanociencia y la nanotecnología han evolucionado mucho en los últimos años, siendo capaces de fabricar máquinas moleculares que realizan trabajos para nosotros a unos tamaños inimaginables. Ya en 1959, Richard Feynman, premio Nobel de Física en 1965, dijo unas palabras acerca de estas máquinas moleculares: "¿Cuál podría ser la utilidad de tales máquinas? ¿Quién lo sabe? No puedo saber exactamente que pasaría pero no tengo ninguna duda que cuando tengamos el control sobre la colocación de cosas a nivel molecular se nos abrirá un enorme rango de posibles propiedades que las sustancias pueden tener y de las cosas que podemos hacer". Por eso, aunque el progreso ha sido impresionante hasta la actualidad, este campo de la ciencia y la tecnología de lo pequeño, de lo invisible, tiene mucho que ofrecernos en el futuro. Todavía nos vamos a asombrar con lo que descubriremos ese mundo diminuto.

## Referencias

[1] Nanotechnology, 9 volúmenes, 2009, Wiley-VCH.
[2] V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, Molecular Devices and Machines, 2008, Wiley-VCH.
[3] http://www.ibm.com/madewithatoms
[4] E. R. Kay, D. A. Leigh, F. Zerbetto, Angew. Chem. Int. Ed. 2007, 46, 72 – 191.
[5] T. R. Kelly, M. C. Bowyer, K. V. Bhaskar, D. Bebbington, A. Garcia, F. R. Lang, M. H. Kim, M. P. Jette, *J. Am. Chem. Soc.* 1994, 116, 3657 – 3658.
[6] X.-B. Wang, B. Dai, H.-K. Woo, L.-S. Wang, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005, 44, 6022 – 6024.
[7] P. R. Ashton, R. Ballardini, V. Balzani, S. E. Boyd, A. Credi, M. T. Gandolfi, M. Gómez-López, S. Iqbal, D. Philp, J. A. Preece, L. Prodi, H. G. Ricketts, J. F. Stoddart, M. S. Tolley, M. Venturi, A. J. P. White, D. J. Williams, *Chem. Eur. J.* 1997, 3, 152 – 170.
[8] M. Barboiu, J. -M. Lehn, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2002, 99, 5201 – 5206.
[9] T. Muraoka, K. Kinbara, Y. Kobayashi, T. Aida, *J. Am. Chem. Soc.* 2003, 125, 5612 – 5613.
[10] C. A. Hunter, G. A. Breault, P. C. Mayers, *Tetrahedron* 1999, 55, 5265 – 5293; b) F. Vögtle, O. Safarowsky, B. Windisch, A. Mohry, *J. Prakt. Chem.* 2000, *342*, 437 - 444; c) A. Yerin, E. S. Wilks, G. P. Moss, A. Harada, *Pure Appl. Chem.* 2008, 80, 2041 - 2068.
[11] C. O. Dietrich-Buchecker, J.-P. Sauvage, J. P. Kintzinger, *Tetrahedron Lett.* 1983, 24, 5095 – 5098.
[12] C. A. Schalley, F. Vögtle, K. Beizai, *Acc. Chem. Res.* 2001, 34, 465 – 476.
[13] W. R. Dichtel, O. Š. Miljanić, W. Zhang, J. M. Spruell, K. Patel, I. Aprahamian, J. R. Heath, J. F. Stoddart, *Acc. Chem. Res.* 2008, 41, 1750 – 1761.
[14] J.-P. Sauvage, *Acc. Chem. Res.* 1998, 31, 611 – 619.
[15] N. Armaroli, V. Balzani, J.-P. Collin, P. Gaviña, J.-P. Sauvage, B. Ventura *J. Am. Chem. Soc.* 1999, 121, 4397 – 4408.
[16] J. Berná, D. A. Leigh, M. Lubomska, D. M. Mendoza, E. M. Pérez, P. Rudolf, G. Teobaldi, F. Zerbetto *Nat. Mater.* 2005, 4, 704 – 710.
[17] J.-F. Morin, D. Thibeault, *Molecules* 2010, 15, 3709 – 3730.
[18] V. Blanco, A. Carlone, K. D. Hänni, B. Lewandowski, D. A. Leigh *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, 51, 5166 – 5169.
[19] A. P. de Silva, N. D. McClenaghan, *Chem. Eur. J.* 2004, 10, 574 – 586.

# Patentes, punto de unión entre la ciencia, la técnica y el derecho

**Pablo González Arias**
Examinador de patentes en la Oficina Europea de Patentes de Berlín

Este año se cumplen cuarenta de la firma de la Convención Europea de Patentes, que fue el germen de la posterior creación de la Oficina Europea de Patentes; un espacio común europeo donde se dirimen las concesiones de patentes. La investigación española está aún, en este tema, retrasada con respecto a la desarrollada por sus vecinos; una de las causas es sin duda el desconocimiento de este mundo que está a caballo entre la ciencia y el derecho vía el desarrollo técnico. El presente artículo pretende ilustrar someramente sobre este tema que por desconocido no deja de ser apasionante.

## Introducción

Dentro del gremio, si se puede denominar así a los que compartimos la profesión de examinadores de patentes, tenemos a orgullo el poder contar con un miembro tan ilustre, para los que amamos la física, como Albert Einstein, que la ejerció entre los años 1902 y 1909, seguramente su periodo más activo en cuanto a su creación científica se refiere. Aunque luego volveremos sobre este periodo y sin abandonar al personaje, lo que nos importa ahora es que, al parecer, el joven Einstein atravesaba una etapa de desencanto en la que, como con toda seguridad muchos de nosotros también hayamos padecido, tras conseguir el título en 1900 no lograba un empleo que le proporcionase cierta estabilidad y con casi veintiún años la ciencia empezaba a perder para él todo atractivo.

Por medio del padre de Marcel Grossmann, un compañero del Politécnico de Zurich, logra una entrevista de trabajo con el director de la Oficina Suiza de Patentes, en Berna. Durante la entrevista, si seguimos el relato de la leyenda, el joven Einstein es preguntado sobre lo que sabe de patentes, a lo que contesta que absolutamente nada. Pese a lo contundente de la respuesta, logra el puesto de trabajo y se convertirá durante los años posteriores en un examinador de patentes.

Albert Einstein en su escritorio de examinador de la oficina de patentes de Berna en 1905.

Einstein no solamente trabajó como examinador de patentes, sino que fue titular de varias. Entre ellas podemos citar la máquina fotográfica automática, que regulaba el diafragma, o un moderno sistema fonográfico.

*Revista de Ciencias*, 2, 13-18, junio 2013
ISSN: 2255-5943

Salvando las distancias, y obviamente los tiempos, ese desconocimiento del mundo de las patentes es compartido por muchos de nuestra comunidad científica, así que aprovecho aquí que este año celebramos el 40 aniversario de la firma de la Convención Europea de Patentes (EPC en sus siglas en inglés) que dio origen a la creación de la Oficina Europea de Patentes (*European Patent Office*, EPO) para aportar un poco de luz sobre el tema, así como abrir un foro de reflexión sobre nuestra labor, tanto de estudiantes, profesores, como de investigadores y examinadores de patentes.

Como decía, celebramos en 2013 el cuadragésimo aniversario de la conferencia diplomática establecida a tal fin y que dio luz a la firma de la Convención Europea de Patentes como texto jurídico común aplicable en materia de patentes a un conjunto de países del entorno y que permitió la creación en 1977 de la Oficina Europea de Patentes con siete Estados miembros (Francia, Alemania, Países Bajos, Bélgica, Luxemburgo, Suiza y Gran Bretaña) como pioneros en su creación. Se establecieron las sedes de la institución en Múnich y La Haya (posteriormente se añadirían las de Berlín y Viena) y se instauraron como idiomas oficiales el inglés, el francés y el alemán.

La necesidad primordial de contar con un organismo de gestión en la concesión de las patentes a nivel supranacional que mejorase notablemente la calidad del proceso, así como la posibilidad de establecer una herramienta jurídica común y una jurisprudencia aplicable, impulsaron a los países firmantes a dar este paso histórico que supuso una mejora extraordinaria en términos tanto de incentivación económica como de investigación dentro de Europa.

Durante este largo periplo, la Oficina Europea de Patentes ha conseguido un reconocimiento unánime a su tarea y ha logrado situarse en la vanguardia a escala mundial tanto por el número de solicitudes como por la calidad en el desempeño de su tarea. En la actualidad y tras estos primeros cuarenta años de trayectoria, 38 países configuran la lista de los Estados miembros que conforman la Oficina, en la que los 27 que integran la Unión Europea están incluidos, y pronto se ampliará esta cifra hasta los 40. En lo que a España respecta, firmó su adhesión en 1987 junto a Grecia, convirtiéndose en undécimo y duodécimo Estados en hacerlo.

Pero vamos a lo fundamental de este artículo.

## ¿Qué es una patente y para qué sirve?

Para responder a esta pregunta trataremos la cuestión con un lenguaje sencillo y vayan de antemano mis disculpas si algún jurista o especialista en derecho mercantil se sintiese ofendido, pero el uso de este registro lingüístico tiene como único objetivo el lograr una mejor comprensión de la materia. Dicho esto, podemos establecer que una patente es un derecho que el Estado concede a su titular para comercializar en exclusiva un producto o procedimiento que resuelva un problema técnico con aplicación industrial. Este derecho en exclusividad tiene dos características una temporal y otra geográfica; la temporal permite un máximo de veinte años de disfrute, la geográfica circunscribe en qué países es vigente este derecho.

Ahora ya podemos entender cuál era la motivación de los países firmantes de la EPC. Al ser cada país quien legítimamente tiene la potestad de otorgar derechos de patentes, un solicitante en un entorno común, como es el europeo, se encontraba con resultados dispares dependiendo del país de solicitud. Con la creación de la Oficina Europea de Patentes, en un solo proceso administrativo los solicitantes pueden obtener una patente en los países que se desee, sin tener que iniciar un largo peregrinaje que deambule por todas y cada una de las oficinas nacionales, con los inconvenientes, tanto jurídicos como económicos que esta práctica conlleva. Con esto, como es obvio, se mejora la calidad al poder utilizar recursos compartidos y, por lo tanto, se logra dinamizar la economía de la zona.

El derecho de patente funciona desde el punto de vista mercantil como un título de propiedad, cuyas transacciones están regidas por las disposiciones legales de transmisión a tales efectos, es decir, se puede vender, comprar, ceder, heredar, etc. Cuando la patente expira, es decir, finaliza el tiempo de protección, la invención pasa a ser de dominio público y cualquier persona, física o jurídica, puede comercializar la invención.

Pero que nadie crea que todo es patentable. Para que una invención pueda obtener un derecho de patente ha de cumplir ciertos requisitos:

- Ha de ser nueva; quiere esto decir que la idea que se pretende proteger no ha tenido que haberse hecho pública con anterioridad, ya sea en una conferencia, artículo de divulgación, libro u otro medio.
- Ha de ser inventiva, o sea, no puede ser obviamente deducida por una persona que conozca el campo técnico en cuestión; y por último,
- Ha de ser aplicable industrialmente, esto es, ha de resolver un problema técnico industrial.

Las exenciones de patentabilidad están delimitadas y su uso ha de ser aceptado conforme a derecho.

Dentro de las exenciones podemos citar las teorías científicas o los métodos matemáticos. También están excluidos los métodos comerciales, las obtenciones vegetales o animales, los programas informáticos y los métodos para tratamiento médico. Estas exenciones son las aplicables al ámbito de la EPO. Como decíamos, la potestad de conceder una patente depende del ámbito legislativo del país en cuestión y estos requisitos varían de un país a otro.

Pero una patente no conlleva solamente privilegios para el que la obtiene, el solicitante está obligado a hacer pública su invención en modo tal que cualquier experto en el mismo campo técnico sea capaz de reproducirla. Desde el punto de vista etimológico, la palabra patente deriva del latín *patens*, *patentis*, participio presente del verbo *patere* que significa estar descubierto, ser manifiesto. Así, la definición aportada por la Academia de la Lengua es la de manifiesto, visible.

De este modo, el sistema de patentes funciona, desde el punto de vista del derecho, como un *quid pro quo*. El solicitante de una patente obtiene un privilegio otorgado por el Estado (es decir, el conjunto de la sociedad) a cambio de compartir la descripción de cómo se realiza y se pone en práctica la invención. El intercambio es de esta manera recíproco y así el resto de la sociedad, incluidos los competidores, puede continuar mejorando la técnica y optimizando recursos económicos y evitando gastos en duplicidad de líneas de investigación.

La filosofía que subyace en el sistema de patentes tiende a alentar la innovación y a economizar en el desarrollo. Premia al que la realiza y toda la sociedad tiene acceso al conocimiento técnico.

Frente al sistema de patentes, como protección a los resultados de la investigación, está el secretismo, que consiste en no hacer públicos los resultados, evitando así que la competencia y el resto de la sociedad los conozca y propiciando la exclusividad en el conocimiento de un grupo, sea este económico, científico o una mezcla de ambos.

## ¿Cómo se obtiene una patente?

Hasta ahora hemos estado hablando de las patentes en un entorno europeo. Para obtener una patente en dicho entorno, el solicitante ha de presentar una solicitud en la EPO (si desea obtener la protección en un solo trámite administrativo para los países integrantes que desee) o en cada una de las oficinas nacionales donde quiera obtener protección para su invento. Son las oficinas de patentes las encargadas de concederlas. En dichas oficinas el solicitante ha de presentar una solicitud donde ha de constar el título, el campo técnico, los antecedentes técnicos sobre el problema a resolver, una descripción del invento acompañado de dibujos o diagramas y un elenco de reivindicaciones. Las reivindicaciones son quienes determinan desde el punto de vista tanto técnico como jurídico la protección de la patente.

A partir de entonces es cuando entramos en escena los examinadores de patentes. Nuestra misión consiste en encontrar documentación publicada con respecto al problema y a la solución aportada por el solicitante. Una vez seleccionados cuáles son los documentos que más se acercan a lo descrito en la invención, nuestro trabajo se centra en cotejar la invención con lo publicado con anterioridad y, conforme a la ley, decidir la concesión o no de la solicitud y determinar las delimitaciones de la patente a conceder. Nuestro trabajo se sitúa pues, entre el mundo de la técnica y el derecho, pero con predominio del primero. De hecho, nuestra formación, como examinadores, es técnica y no jurídica.

## ¿Qué pasa en el resto del mundo?

Hasta ahora hemos estado hablando en un entorno europeo y hemos mencionado, de pasada, que existen diferencias en la legislación de los países con referencia a las patentes. Para obtener una patente con un rango de aplicación mundial el solicitante ha de ir a cada país donde quiera obtener la patente. Además de la Oficina Europea de Patentes, contamos también con la Organización Regional Africana de la Propiedad Intelectual (ARIPO) donde en un solo procedimiento se puede obtener protección para los Estados miembros. Existe, empero un mecanismo de presentar una solicitud internacional para los Estados firmantes del Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PCT). Gracias a este acuerdo se simplifican las solicitudes en los países miembros, pero cada Estado otorgará una patente a la solicitud. La Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO), con sede en Ginebra, es la encargada a nivel mundial de regular todo lo concerniente a patentes, aunque también abarca otros sectores de la propiedad intelectual, como derechos de autor, marcas y diseños. En la actualidad cuenta con 186 Estados miembros.

## Controversia sobre patentes *software*

Uno de los temas que ha suscitado mayor controversia en los últimos tiempos en relación al mundo de las patentes es el de las patentes de software.

Como decíamos al inicio, la legislación relativa a patentes depende de cada país y en ella se recoge todo lo referente a su tramitación y concesión, así como a los límites de su protección, Si bien estas

diferencias entre las diversas legislaciones son mínimas, en el caso de la protección a programas informáticos, algunos países -tal es el caso de los Estados Unidos de América o Canadá- permiten dicha concesión, mientras que en Europa está totalmente vetada.

La controversia tiene su origen en el hecho de que en el mundo actual, con el desarrollo técnico de hoy en día, es en la práctica imposible la aplicación de muchas invenciones sin la necesaria participación de elementos informáticos programables que lo lleven a cabo y, por consiguiente, dichos elementos, en una línea de opinión generalizada, deberían estar protegidos.

La doctrina jurídica que seguimos en Europa es la de no permitir, como comentamos con anterioridad, la patentabilidad de programas informáticos como tales. La protección que dichos programas pueden obtener es la de derecho de autor. La argumentación se basa en que en la EPO, y por lo tanto en Europa, diferenciamos entre software e invenciones que precisan de ordenadores para ser implantadas. De modo tal que la doctrina seguida en Europa es la de no conceder patentes para programas informáticos si este no conlleva un carácter técnico -como por ejemplo un método que resuelva un problema técnico- que fuese susceptible de ser patentable per *se*, sin necesidad del programa informático. De este modo, el programa informático puede ser considerado como un medio de poner en práctica dicho método para resolver el problema técnico en cuestión.

## Debate sobre la conveniencia de patentes *software*

El conjunto de la sociedad ha sido testigo en el pasado de posiciones que dudaban de la bondad del sistema y, circunscribiéndose al *software*, solicitaban que no existieran patentes en ese campo. Su argumento era la defensa del desarrollador particular o las pequeñas empresas del sector que no podían competir con los grandes gigantes mundiales. Creo, con toda sinceridad, que estos argumentos se realizaban desde el desconocimiento, ya que la única manera, en la práctica, de poder competir en igualdad de condiciones es a través de la obtención de patentes que protejan los resultados de la labor investigadora de las empresas. En especial si estamos hablando de un sector como el informático en que las grandes multinacionales copan el mercado mundial y que por su dinamismo, precisa de un gran esfuerzo económico en investigación y desarrollo que muy pocas compañías tienen la capacidad de afrontar. El sistema de patentes es precisamente el garante que regula el derecho de cada una de las innovaciones en igualdad, con independencia del tamaño o la potencialidad de las empresas.

Dicho más simplemente, un pequeño desarrollador de *software* puede obtener la misma protección que una gran compañía y poder negociar ese derecho. Por contra, si no existiera dicha protección, los resultados de la investigación de cualquiera podrían ser comercializados por terceros y quien tuviese mayor capacidad financiera o comercializadora sería quien más se beneficiaría de los resultados de la investigación, propia y ajena.

Pero ahora bien, ¿qué pasa si una empresa o un grupo de investigación obtiene resultados susceptibles de ser patentados y no está interesado en hacerlo? En este caso y sin entrar en los motivos que llevan a actuar con semejante estrategia, en líneas generales pueden suceder dos cosas:

- Que no haga público sus resultados. Imaginemos que se da esa circunstancia y otro grupo de investigación, tiempo después, llega a resultados iguales o similares. Este segundo grupo podría, si así lo desea, solicitar la patente, y así obtener las protecciones que hemos mencionado.
- Que sí haga público sus resultados. Recordemos que al inicio resaltábamos cómo uno de los requisitos para obtener una patente era que fuera nuevo, es decir, que no hubiese sido hecho público con anterioridad a la solicitud. Pues bien, al hacerlo público impedimos que pueda ser patentado, ni siquiera por los autores de la investigación, de este modo pasaría a ser propiedad de la humanidad y cualquiera podría comercializar los resultados sin ningún tipo de restricción ni protección.

## Importancia de las patentes como medidores de actividad investigadora

Las patentes tienen una importancia intrínseca en el ámbito científico-técnico como medidoras de la actividad investigadora. Si bien es cierto que intentar determinar tanto la cantidad como la calidad de la actividad investigadora es una tarea harto difícil y que no contamos con herramientas que nos determinen con precisión esa variable, los resultados de la investigación, provenga esta de centros públicos como de grupos privados puede ser mesurable teniendo en cuenta no solamente el número de publicaciones o el número de citas a trabajos internos en publicaciones externas, sino cotejando tanto el número de solicitudes de patentes como el número de concesiones de dichas solicitudes. De este modo, las patentes se convierten en un referente ligado a la actividad investigadora.

Las cifras de patentes españolas en comparación con los países del entorno no son para nada satisfactorias. En el pasado año el número de solicitudes procedentes de España que se presentaron a la Oficina Europea de Patentes fue de 2.523, lo que corresponde a una media de 53,69 por millón de habitantes, media que se sitúa por debajo de la de Chipre, Malta o San Marino y solo por encima de la de Portugal, Grecia y de los antiguos países del bloque del este con excepción de Eslovenia.

En lo que respecta a las patentes provenientes de la Universidad de Valladolid, los datos proporcionados por la Oficina de Transferencia y Resultados de Investigación (OTRI) y publicados por los medios de comunicación en 2008 cifraban en 55 las patentes de la UVa de las que solamente tres estaban, en dicha fecha, en el mercado. En la actualidad, el número total de patentes a nombre de la Universidad de Valladolid es de 58, a las que hay que añadir otras 24 que están aún en fase de tramitación.

Hay que destacar que pese a que ha sido significativo el aumento de solicitudes en los últimos dos años, aún estas cifras distan mucho de reflejar la calidad de la investigación proveniente de esta institución, y esto no es un hecho aislado, sino común en la gestión de resultados provenientes de la investigación en la universidad española. Es como, si se me permite el ejemplo, se pusiera mucho empeño en mejorar tanto la calidad como la cantidad de un cultivo determinado y no se pusiera ninguno en cosecharlo.

Podemos pues concluir, a la luz de estos datos, que existe una disociación manifiesta entre el mundo de la investigación proveniente de las universidades españolas y las patentes cuyos orígenes, entre otros, tienen que ver con razones socioculturales e históricas.

## El examinador de patentes

Con toda seguridad encontremos en nuestro ínclito Albert Einstein el mejor ejemplo para ilustrar la disociación de ambos mundos.

Como decíamos al inicio de este artículo, los siete años que el padre de la relatividad estuvo trabajando como examinador de patentes fueron los más fructíferos de su vida, pero también, con toda certeza, lo fueron de toda la humanidad, de tal modo que podríamos denominarlos, sin temor a exagerar, como los más revolucionarios de la historia de la física, donde un joven científico publicó cinco artículos que transformaron nuestra concepción del mundo y puso los pilares de la física moderna.

No tengo ninguna duda de que la aportación de Einstein al mundo de la física, de no haberse producido, se habría alcanzado en breve de la mano de otros científicos, si bien, más aventurado sería conjeturar quiénes y cuándo habrían de producir dichos descubrimientos, lo que nos lleva a plantearnos por las claves que llevaron a los hechos mencionados y concluir que, si bien, es determinante la capacidad e inteligencia del propio Einstein, el entorno donde desarrolló su labor profesional fue, al parecer, también determinante.

Según el propio Einstein disfrutaba mucho de su trabajo ya que "resultaba extraordinariamente diverso". En la Oficina de Patentes, o como él mismo la denominaba, "en ese claustro mundano donde concebí mis más hermosas ideas", pudo observar a diario "las ramificaciones físicas de los conceptos teóricos" y dicha observación posteriormente lo llevaría a reflexionar si habría tenido el mismo resultado productivo de haberlo desarrollado en un entorno más "académico". Según Walter Isaacson, el mismo Einstein señalaría más tarde que la originalidad y la creatividad no constituían el principal activo a la hora de ascender en el escalafón académico, en especial en el mundo de habla alemana, y se habría visto presionado a atenerse a los prejuicios de la opinión de sus superiores, ante lo que afirmaba: "Una carrera académica en la que una persona se ve forzada a producir escritos científicos en grandes cantidades crea el peligro de la superficialidad intelectual".

Seguramente las palabras anteriores nos hagan reflexionar sobre cuál es el papel científico que han de jugar las patentes. Mi trabajo consiste en evaluarlas y para ello tengo el inmenso privilegio de tener encima de mi mesa, en exclusividad y antes de ser publicado, lo último de lo último, el resultado del esfuerzo de un grupo de científicos convencidos de que su trabajo merece la concesión de una patente.

Bien es cierto que el resultado de dicho desarrollo científico pasa por el filtro de los abogados de patentes hasta producir la solicitud que se ha de examinar y en ese proceso se desprende del léxico puramente científico para adquirir uno más jurídico, pero la esencia es puramente técnica.

A mi modo de ver, el entorno donde he desarrollado mi trayectoria profesional: el mundo del desarrollo tecnológico, la investigación académica y el mundo de las patentes, todos deberían ser indisociables y, por contra, a pesar de que me resulte paradójico, se podría decir que viven de espaldas el uno del otro. Como decía el propio Albert Einstein, conocedor de ambos: "las teorías físicas tienen mucho de invento, más que de descubrimiento".

Y aunque resulte duro afirmarlo, durante mi trayectoria académica y profesional no me he encontrado ningún artículo científico donde se citaran patentes como base bibliográfica y cada vez que he preguntado al respecto a profesionales con una reconocida trayectoria investigadora la respuesta ha sido la misma: el desconocimiento.

## El inventor

Pero nada de lo que hemos hablado tendría sentido sin la existencia de un personaje fundamental de este entramado: el inventor.

En relación con esto, el pasado 28 de mayo nos despertábamos con la noticia de que por vez primera un español, el ingeniero burgalés D. José Luis López Gómez, era galardonado con el premio popular al inventor europeo que en su octava edición concede la Oficina Europea de Patentes. López Gómez lograba alzarse con el único galardón que se obtiene a través de votación popular entre el público europeo. Lo hacía como autor de una invención de un sistema que corrige la posición de las ruedas en su posición de contacto con el raíl, perfeccionando así el tren articulado Talgo y mejorando la estabilidad de los trenes de alta velocidad.

Esta noticia, aunque a priori no lo parezca, es de extrema importancia para la imagen de la investigación en España y, a pesar de los datos antes expuestos, hay motivos para ser optimistas.

José Luis López Gómez, ingeniero español recientemente galardonado con el premio popular al inventor europeo 2013. (Foto EPO)

Mucho ha sido el esfuerzo realizado para revertir esta tendencia histórica y muchos los que lo realizan a diario. Sirva este artículo en señal de tributo a todos ellos.

## Para saber más

1 - Oficina Europea de Patentes. http://www.epo.org
2 - Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. http://www.wipo.int
3 - Banesh Hoffmann. Einstein: Creator and Rebel.
4 - Walter Isaacson. Einstein: His life and Universe.
5 - El Norte de Castilla, edición del 7 de diciembre de 2008, pg. 2 y 3.

### Nota editorial

El autor desempeña su profesión como examinador de patentes en la Oficina Europea de Patentes de Berlín desde hace 14 años. De formación académica físico, fue alumno de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid y actualmente colabora con esta Universidad en diferentes aspectos académicos.

# La percepción acústica: Física de la audición

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

Este artículo aborda desde una perspectiva física el fenómeno de la audición. En un principio se hace una exposición de las características que hacen del oído humano un eficientísimo analizador de sonidos. En segundo lugar se expone la teoría de la Localización, propuesta por G.V. Békèsy y el concepto de Banda Crítica, necesarios para la comprensión de la audición. Se complementa con demostraciones audiovisuales on-line a las que el lector puede acceder siguiendo los hipervínculos insertados en el texto. Dichas demostraciones hacen la lectura más amable y comprensible.

## Introducción

La Acústica es el área de la Física que se ocupa del estudio de las ondas de presión, responsables de los sonidos y adquiere importancia en la medida en que la percepción de estos constituye, junto con las imágenes, la principal forma de relación del ser humano con el entorno. El estudio del fenómeno de la audición se divide en tres fases netamente diferenciadas:

- El estudio de la naturaleza de los sonidos y cómo estos interactúan con el oído.
- Cómo funciona el oído.
- Cómo se transforman los estímulos acústicos en impulsos nerviosos y cómo estos son interpretados por el cerebro.

La primera corresponde claramente a la Física, más en concreto a la Acústica, involucrando también a la Ondulatoria y la Mecánica. La segunda concierne a la Otoacústica, una disciplina a mitad de camino entre la Física y las ciencias médicas que forma parte de la Física Médica, presente en los planes de estudio de Medicina. En cuanto a la tercera diremos que se trata de una problemática alejada por completo de la Física que cae de lleno en el campo de la Psicoacústica.

Planteadas así las cosas, se ha de aceptar que cualquier intento de dar respuesta a las preguntas: ¿cómo y porqué oímos? ¿a qué se debe que dos sonidos musicales simultáneos puedan sonarnos agradables (consonantes) o desagradables (disonantes)? ¿cómo discrimina nuestro oído entre los diferentes timbres de sonidos distintos de la misma altura? ¿cómo es posible que conozcamos la situación de un foco sonoro aún con los ojos vendados? etc., pasa por la consideración de todos estos problemas desde el punto de vista físico y el psicológico. Pretender abordar estos problemas desde la Física con exclusividad supone un mal inicio abocado a conclusiones parciales y, en el peor de los casos, erróneas.

He aquí las razones por las que el problema de la audición, que nos es muy cercano por afectar a todos y cada uno de los minutos de nuestra existencia, es tratado marginalmente en los planes de estudio de Física y Psicología recibiendo mayor atención en los estudios de Medicina; eso sí, supeditado a la curación de las patologías auditivas.

## Estructura del oído

Es bien sabido que la onda sonora está conformada por una serie de compresiones y enrarecimientos; es por consiguiente, una onda de presión de amplitud P. El oído humano es un sofisticadísimo sistema capaz de detectar frecuencias acústicas comprendidas en el rango de 20–20.000 Hz. Algunos seres, como murciélagos y delfines, son capaces de captar frecuencias por encima de 20 kHz (ultrasonidos) y otros, como elefantes y ballenas, pueden percibir frecuencias por debajo de 20 Hz (infrasonidos). El oído humano es particularmente sofisticado, no en los márgenes de frecuencia ni en los umbrales de

*Revista de Ciencias*, 2, 19-26, junio 2013
ISSN: 2255-5943

audición (donde muchos animales le superan ampliamente) sino en su capacidad para distinguir los distintos timbres. Así pues, el oído humano se comporta como un sofisticado sistema analizador de sonidos; el cuerpo humano es un diseño resultante de millones de años de evolución; en ese proceso la especie humana "apostó" por el desarrollo cerebral y por la organización social compleja y, por ello, era necesario desarrollar un oído que fuera capaz de reconocer las voces de los distintos individuos del grupo.

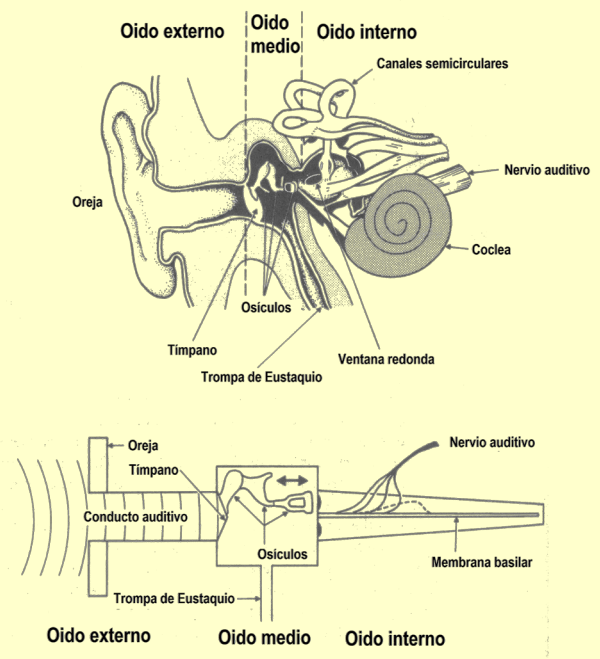



**Figura 1:** Las ondas de presión acústica son captadas por la oreja y amplificadas por el conducto auditivo. Estas hacen vibrar el tímpano y sus vibraciones son transmitidas por la cadena de huesecillos del oído medio hasta el oído interno donde, finalmente, son convertidas en estímulos nerviosos (debajo: símil mecánico).
Adaptada de Rossing, 1990.

El oído puede detectar sonidos que en su propagación por el aire producen variaciones de presión que son muy pequeñas, del orden de 20 μPa, si se las compara con la presión atmosférica que es del orden de 105 Pa. Por otro lado, el intervalo de presiones correspondientes a sonidos audibles va de 20 μPa a $10^8$ μPa. En consecuencia, el rango de intensidades de los sonidos audibles es más de $10^{12}$ unidades, es decir, la intensidad del sonido más intenso que el oído puede percibir ($10^{-4}$ Watt/cm$^2$) es un billón de veces mayor que la de un sonido apenas audible ($10^{-16}$ Watt/cm$^2$). Esto equivale a un intervalo 1000 veces superior al rango de intensidades luminosas que el ojo puede ver.

La estructura del oído es un diseño, fruto de la selección natural, en el que se conjugan la miniaturización y la eficiencia funcional. Así, la oreja cumple una doble función: amplificadora al recoger la máxima cantidad de energía acústica concentrándola en el conducto auditivo y direccional, permitiendo la localización del foco sonoro.

El conducto auditivo o meato actúa como un resonador de banda ancha, con una frecuencia de resonancia de unos 3000 Hz. Sus dimensiones medias son 0,7 cm de diámetro por 2,7 cm de longitud. Se comporta como un tubo tapado que resuena con los múltiplos impares de la frecuencia fundamental proporcionando una ganancia de unos 10 db en la banda de frecuencias comprendida entre 2 y 6 kHz. Su frecuencia más baja de resonancia está situada en torno a los 3000 Hz

El tímpano es una membrana aproximadamente circular de unos 8 o 9 mm de diámetro, de 65 a 80 mm$^2$ de superficie, 0,1 mm de espesor y 14mg de peso. Tiene forma cónica, presentando su vértice por debajo del centro y proyectado hacia adentro. En su cara interna está adherido el martillo, primer huesecillo del oído medio. Establece el límite entre el oído externo y el medio, actuando a modo de una membrana microfónica. Su peculiar propiedad es que se trata de un resonador muy amortiguado, por lo que posee un gran intervalo de resonancia que cubre con eficacia la gama comprendida entre 20 y 20000 Hz.

Desde el punto de vista físico, el tímpano se comporta como un parche que cierra el tubo constituido por el canal auditivo. Este puede vibrar siguiendo las oscilaciones de la onda sonora que ingresa desde el exterior y trasmite al oído medio vibraciones cuyas amplitudes van desde 10-11 m para los sonidos más débiles hasta 2 mm para los sonidos más intensos. Presenta distintos modos de vibración a las distintas frecuencias, para bajas frecuencias vibra como un solo cuerpo rígido en torno a un eje que pasa horizontalmente por su borde superior, mientras que para frecuencias superiores a 2.400 Hz vibra en segmentos como el parche de un tambor cuyo patrón de vibración depende de cada frecuencia particular. De esta forma la vibración de las moléculas de aire producida por la onda sonora en el oído externo se convierte en el tímpano en un movimiento mecánico que se transmite al oído medio.

Los huesecillos del oído medio tienen por finalidad transmitir las vibraciones del tímpano hasta la cóclea, órgano en el que las vibraciones mecánicas son convertidas en impulsos nerviosos. Están sujetos entre sí por unos diminutos músculos que son capaces de modificar su tensión con objeto de disminuir la amplitud de los movimientos si el

sonido es intenso. Este fenómeno está controlado por el cerebro y se denomina reflejo acústico. Se trata de un efecto "sordina" con el que el oído se protege de los sonidos excesivamente intensos, evitando así posibles daños en el delicado oído interno. El reflejo acústico tarda del orden de medio segundo en entrar en acción por lo que, realmente, se está en indefensión ante sonidos violentos e inesperados, tales como disparos, explosiones, etc.

La cóclea es una cavidad hermética cuyo interior está anegado por un líquido denominado linfa. Con objeto de ahorrar espacio está arrollada en espiral, formando dos y media vueltas, con una longitud de unos 30 mm. Se encuentra dividida longitudinalmente por una membrana flexible, llamada membrana basilar, sobre la que se asientan los filamentos terminales del nervio auditivo, en número de unos 26000. A su vez, existe una segunda membrana también longitudinal, llamada membrana de Reissner. Ambas membranas dividen el volumen interno de la cóclea en tres segmentos paralelos, los cuales están llenos del fluido linfático. La cóclea tiene una sección variable, de unos 4 $mm^2$ en el lado basal y de 1 $mm^2$ en el apical. La cavidad mayor es el canal vestibular, con un volumen de unos 54 $mm^3$ y está separada por la membrana de Reissner de otra cavidad más pequeña y de unos 7 $mm^3$ que constituye el canal medio. Este, a su vez, está separado por la membrana basilar de una tercera cavidad de aproximadamente 37 $mm^3$ denominada canal timpánico (Fig. 2)

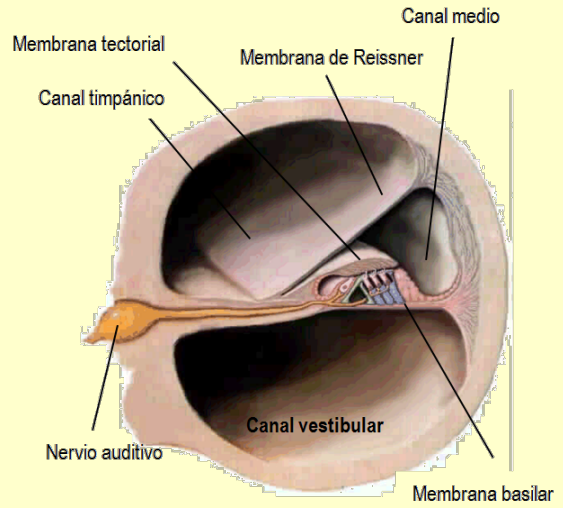



**Figura 2:** Corte transversal de la cóclea.

El canal medio (también llamado coclear) contiene la endolinfa, un líquido viscoso cuya finalidad primordial es la protección de los delicados terminales neuronales. El conjunto formado por la membrana basilar y los terminales nerviosos, se denomina órgano de Corti. Este complejo constituye el "corazón" del oído, siendo su función el convertir las vibraciones mecánicas en corrientes nerviosas. Los otros dos canales, intercomunicados por el helicotrema, están llenos por la perilinfa, según muestra la figura 3.

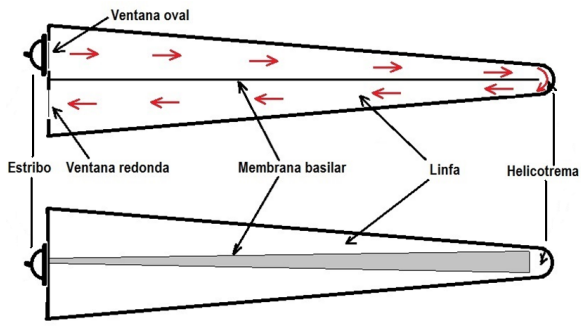



**Figura 3:** Esquema de la cóclea desenrollada. Arriba vista lateral mostrando la circulación de la linfa bajo los impulsos acústicos y abajo una vista superior mostrando la "asimetría" de la membrana basilar.

## La audición

Se debe a Georg Von Békésy, Premio Nobel de Medicina en 1961, la explicación teórica del funcionamiento de la cóclea. Según su "Teoría de la Localización", el funcionamiento del oído interno parece ser así: Al empujar el estribo la membrana de la ventana oval se produce una sobrepresión en la parte superior del caracol que obliga a circular el fluido linfático hacia la cavidad inferior a través del helicotrema según muestra la figura 3. Ello provoca que la membrana basilar se deforme hacia abajo al tiempo que la membrana elástica que cierra la ventana redonda cede hacia afuera. Si el estribo se mueve sinusoidalmente de izquierda a derecha con una frecuencia n, el efecto producido es la aparición de una onda que se desplaza de izquierda a derecha por la membrana basilar.

La figura 4 muestra cómo se desplaza dicha onda; la velocidad de avance de la perturbación depende de su frecuencia y también del ancho y rigidez de la membrana basilar. Dado que ésta última es más estrecha y rígida por su lado izquierdo (extremo basal) y más ancha y flexible por su lado derecho (extremo apical) el resultado es que en algún punto de la cóclea la velocidad de la onda llega a ser cero (en nuestro esquema, el punto P); en ese punto la onda se para y la energía se absorbe. Llegamos así a la conclusión de que cada punto de la membrana basilar responde de la manera descrita a una determinada frecuencia. Las más altas son detectadas en el extremo basal y las más bajas en el apical (Figura 5).

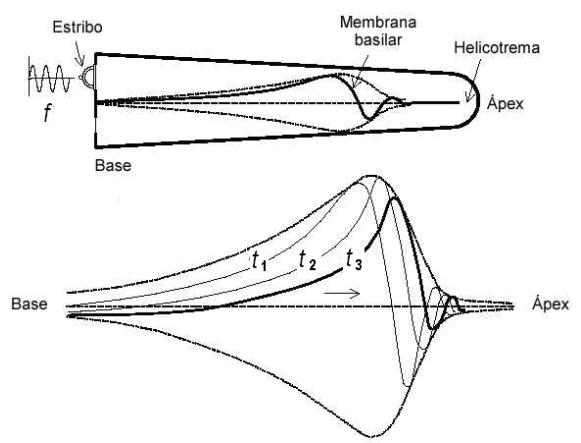



**Figura 4:** Esquema que muestra la excitación selectiva de la membrana basilar por una determinada frecuencia. La membrana basilar es excitada con un movimiento altamente amortiguado con una amplitud que aumenta gradualmente con la distancia a partir del estribo, alcanza un máximo y después disminuye rápidamente hacia el vértice. Adaptada de Pierce, 1983.

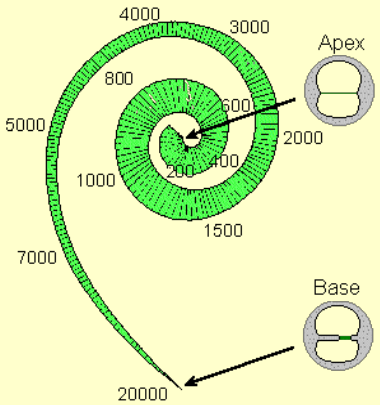



**Figura 5:** Distribución de las zonas de sensibilidad selectiva de la membrana basilar para las distintas frecuencias del espectro acústico.

**Demostración 1:** *Excitación de la membrana basilar a distintas frecuencias.*
*Excitacion coclear.*

La excitación de los terminales neuronales tiene lugar debido a que estos están acoplados a la membrana basilar en tanto que la membrana tectorial está acoplada a la lámina ósea. Así, los movimientos relativos generados entre ambos elementos flexionan las células pilosas y excitan sus terminaciones nerviosas, produciéndose los impulsos eléctricos. Ahora bien, las distintas frecuencias no afectan en igual medida al sistema auditivo. Ciertamente, la banda de frecuencias audibles se extiende desde 20 hasta 20000 Hz, pero la sensibilidad del oído es máxima en la región de 2000-5000 Hz y decrece a bajas y altas frecuencias, tal y como muestra la figura 6.

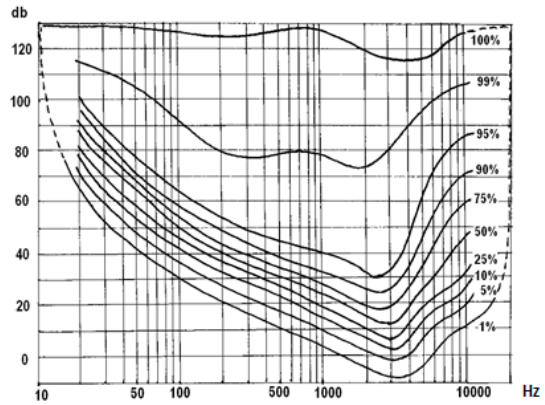



**Figura 6:** Curvas representativas de los umbrales de audición para una extensa población a distintas frecuencias. Los valores porcentuales indican el tanto por ciento de población cuyos umbrales están por debajo de la curva. Salta a la vista que la máxima sensibilidad de nuestro oído se sitúa en la banda 1000-5000 Hz. Por debajo de 20 Hz y por encima de 20.000 Hz somos completamente sordos. Adaptada de Kinsler et al., 1992.

Cuando el oído recibe un sonido musical con todos sus armónicos, cada una de las frecuencias captadas excita un punto de la membrana basilar, de este modo el cerebro puede interpretar no sólo la altura del sonido, sino también su timbre, sin más que discernir qué terminaciones nerviosas fueron excitadas y con qué intensidad lo fueron. De alguna manera pues, el oído interno actúa como un eficacísimo analizador de sonidos. Pero esto no es todo, pues la sensación de altura también puede ser detectada por el cerebro a través de la velocidad con que se suceden los impulsos que llegan al oído. Tal es el caso de la sensación de altura que produce una sirena.

Resumiendo, el oído tiene dos maneras de estimar la altura, una es por el punto de excitación de la membrana basilar. El otro es por la periodicidad con que se envía al cerebro los impulsos nerviosos a través de diferentes fibras, desde distintos puntos de la membrana basilar.

## Banda crítica

En el punto anterior hemos visto que, cuando el oído capta un tono puro, se excita una determinada zona

de la membrana basilar. Esta excitación no se localiza en un punto concreto sino que se extiende por delante y por detrás del pico de máxima excitación. El cerebro es capaz de detectar ese pico y de ello detrae la sensación de altura de los sonidos (Figura 7).

En concordancia con esta idea, se define banda crítica como aquella porción de la membrana basilar que resulta excitada a causa de un tono puro por encima del nivel umbral de audición. Se estima que el rango audible se compone de 24 bandas críticas de una longitud promedio de 1,3 mm conteniendo cada una de ellas 1300 terminales neuronales.

**Figura 7:** Curvas de excitación de la membrana basilar para frecuencias de 50, 200, 400 y 1600 Hz. Adaptada de Rossing, 1990.

Desde otro punto de vista, la banda crítica puede considerarse como la banda de frecuencias con la que dos o más tonos puros excitan casi las mismas células auditivas de la membrana basilar, siendo así difícil distinguirlos como tonos separados. Un ruido cuya anchura de banda sea inferior a la banda crítica se comporta a efectos auditivos como si fuera un tono puro. También cabe decir que la banda crítica es el rango de frecuencias en el que tonos simples suman sus sonoridades. Por el contrario, si las frecuencias de esos tonos difieren en más que el ancho de la banda crítica, no las suman y son percibidos como tonos simultáneos distintos.

**Figura 8:** La anchura de la banda crítica para una determinada frecuencia depende de la forma de la curva de excitación y del umbral de audición para esa frecuencia.

Según se aprecia en la figura 8, el ancho de banda crítica no es uniforme sino que varía con respecto de la frecuencia del pico, de acuerdo con la siguiente tabla:

| Frecuencia pico ν (Hz) | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 10000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ancho de banda Δν(Hz) | 90 | 90 | 110 | 150 | 280 | 700 | 1200 |

El ancho de banda crítica se mantiene constante, del orden de 90 Hz, a bajas frecuencias (entre 100 y 500 Hz) y es casi proporcional a la frecuencia de pico a altas frecuencias. En general, se acepta que es algo menor que 1/3 de octava, o lo que es lo mismo, 4 semitonos, equivalentes a un intervalo de Tercera Mayor (Figura 9).

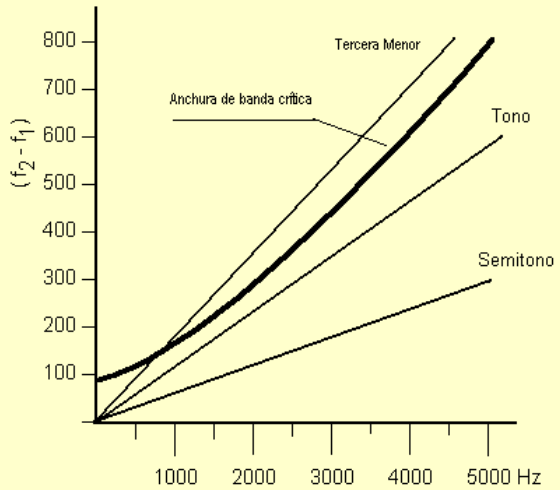



**Figura 9:** Variación de la anchura de banda crítica con la frecuencia de pico. Adaptada de Rossing, 1990.

El hecho de que el ancho de banda crítica sea equiparable a la amplitud del intervalo de Tercera Menor concuerda con lo establecido por la teoría de la consonancia musical, en la que se considera la Tercera Menor como el intervalo consonante más pequeño.

## Intensidad acústica y sensación acústica

Ningún sentido humano es analógico, esto es, no existe proporcionalidad directa entre la intensidad del estímulo y el grado de la sensación percibida. En el caso del oído, podemos percibir desde sonidos extremadamente débiles, próximos al umbral de audición, hasta sonidos de intensidad un billón de veces superior. Sería impensable que el cerebro fuese estimulado de forma proporcional a la intensidad del estímulo, ello sería psíquicamente demoledor. En consecuencia, la Naturaleza ha dispuesto que la sensación que un estímulo acústico produce sea, *grosso modo*, proporcional al logaritmo decimal de la intensidad de este. Por ello, en la física de la audición se distinguen dos magnitudes que no guardan proporcionalidad sencilla entre sí. Estas son la intensidad acústica y el nivel acústico. La primera

se define como la energía en forma de onda sonora que atraviesa en la unidad de tiempo a la unidad de superficie, perpendicularmente dispuesta a la dirección de propagación.

***Niveles acústicos***

En cuanto al *nivel acústico*, empezaremos afirmando que dos focos idénticos actuando simultáneamente, no producen en el oído una sensación doble que uno sólo. Esto se debe a que la sensación sonora se rige, de forma aproximada, por la ley de Weber-Fletcher, según la cual, la sensación es función lineal de logaritmo de la intensidad, es decir, que la sensación crece en progresión aritmética cuando la intensidad lo hace en progresión geométrica. El nivel acústico es una magnitud que se ajusta bastante a la sensación que los sonidos producen en nuestro sistema auditivo. El nivel acústico puede cuantificarse en función de la intensidad, de la presión acústica y de la potencia acústica. Por ello, es frecuente hablar de nivel de intensidad acústica ($L_I$), nivel de presión acústica (Lp) y nivel de potencia acústica ($L_w$) (en función de las conveniencias del momento, se utiliza una de las tres expresiones) y se definen como el logaritmo del cociente entre la intensidad, la presión o la potencia acústica y la intensidad, la presión o la potencia acústica umbral (mínima audible), respectivamente. Las tres expresiones para el nivel acústico son:

$$L_I = 10\log\frac{I}{I_0} \;;\; L_P = 20\log\frac{P}{P_0} \;;\; L_W = 10\log\frac{W}{W_0}$$

Los umbrales de referencia para la definición de estos niveles son: $I_0=10^{-12}$ $Js^{-1}m^{-2}$ ; $W_0=10^{-12}$ $Wm^{-2}$ y $P_0=2\cdot10^{-5}$ $Nm^{-2}$. La presencia de los coeficientes se debe a la necesidad de adaptar estas expresiones a la escala de los decibelios. Así, por ejemplo, si la intensidad de un sonido es 10000 veces superior al valor umbral, entonces:

$$L_I = 10\log 10000 = 10.4 = 40db$$

Igualmente, si la potencia acústica de un sonido $10^{-6}$ $Wm^{-2}$ su nivel acústico será:

$$L_W = 10\log\frac{10^{-6}}{10^{-12}} = 10\log 10^6 = 60db$$

El coeficiente de la expresión del nivel de presión acústica es doble que los otros dos debido al valor umbral de referencia para la presión acústica. Así, por ejemplo, si la presión acústica de un sonido es $10^{-3}$ $Nm^{-2}$ su nivel de presión acústica será:

$$L_P = 20\log\frac{10^{-3}}{2.10^{-5}} = 20\log 50 = 34db$$

Cuando se trata de la sensación sonora producida por el sonido ambiental, se habla de "nivel del ruido" y se mide también en decibelios.

**Demostración 2**: *La escala de decibelios.*
*Escala decibelios.*

Pero aún queda un problema, pues la sensación acústica es una magnitud que siempre está referida a una intensidad umbral. ¿Cuál es ese umbral? Sabemos que hay personas con un oído muy fino y otras que oyen con dificultad; sabemos también que el umbral de un mismo individuo varía según sus condiciones fisiológicas del momento y no menos cierto es que el oído humano no es igualmente sensible a todas las frecuencias. Por todo ello, si se quiere disponer de unos valores umbrales de aplicabilidad lo más extensa posible, no hay más remedio que recurrir a la estadística y elegir una frecuencia patrón. La comunidad internacional de la Acústica tiene establecido como valor para ese umbral:

$I_0=10^{-16}$ $Wcm^{-2}$ (a 1000 Hz)

Aceptado este convenio, el nivel acústico

$$L_I = 10\log\frac{I}{10^{-16}}$$

se mide en unas nuevas unidades, llamadas fonos. Con frecuencia, el nivel acústico medido en fonos se denomina *loudness.* Obviamente, los niveles acústicos medidos en fonos y en decibelios no tienen el mismo valor, pero son bastante próximos. El estudio realizado sobre centenares de individuos permite dibujar las líneas isofónicas, que expresan los niveles de presión acústica (Igualmente, se pueden dibujar las curvas referidas a niveles de intensidad, las cuales no difieren sustancialmente de éstas) que, a distintas frecuencias, proporcionan un mismo nivel de sensación *loudness.*

La figura 10 corresponde al diagrama de las isolíneas de sensación acústica para toda la gama de frecuencias audibles, expresadas en fonos. La curva inferior de cero fonos es la de los sonidos de sensación nula, mientras que la superior corresponde a los sonidos que producen sensación dolorosa. Ello indica que sólo podemos oír sonidos comprendidos entre 0 y 120 fonos. En ella se observa que la sensibilidad del oído es nula por debajo de 16 Hz y por encima de 20000 Hz, siendo máxima a 3000 Hz.

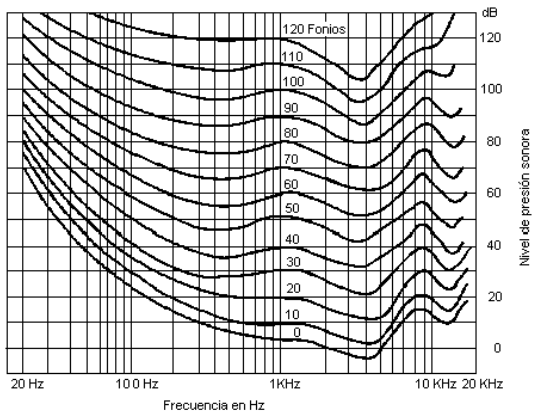



**Figura 10**: Curvas isofónicas para distintos niveles de sensación acústica. Los mínimos de las curvas indican las zonas de mayor sensibilidad. Así, por ejemplo, un tono puro de 1,1 kHz cuyo nivel de presión sea 70 db y un tono puro de 4 kHz cuyo nivel de presión sea 60 db producirán un nivel de sensación de 70 fonos. Para alcanzar esa misma sensación en la frecuencia de 40 Hz se requerirá un nivel de presión de 90 db y si la frecuencia del tono es 10 kHz, se necesitará un nivel de presión algo superior a 75 db para alcanzar el mismo nivel de sensación.
Adaptada de Rossing, 1990.

**Demostración 3:** Respuesta del oído a diferentes frecuencias.
*Respuesta oido.*

***Sensación acústica***

En el punto anterior hemos visto la relación que existe entre la magnitud del estímulo acústico y la sensación que este produce en el sistema auditivo. La ley logarítmica de Weber-Fletcher es aproximada y, verdaderamente, ni los niveles expresados en db ni los expresados en fonos se ajustan totalmente a la sensación subjetiva que el sonido produce y mucho menos para todas las frecuencias del espectro audible. Por ello, en un intento de mejorar la cuantificación de la sensación acústica de los sonidos, se ha establecido la escala sónica. En ella, la unidad es el sono, el cual se define como la sensación acústica que produce un tono puro de 1 KHz cuyo nivel de intensidad sea 40 fonos.

Para niveles de intensidad de 40 fonos o superiores, la sensación subjetiva expresada en sonos se obtiene por aplicación de la fórmula empírica propuesta por la *International Standards Organization* (ISO):

$$S = 2^{(L_I - 40)/10}$$

El diagrama de la figura 11 muestra el comportamiento del sistema psicoacústico a lo largo del espectro audible para diversos niveles de presión acústica. Destaca en ellas el máximo que aparece en la banda de 2000–4000 Hz, lo cual se corresponde con el hecho de que este es el margen de frecuencias para el que el oído humano registra su mayor sensibilidad. También son evidentes los máximos más amplios y menos pronunciados en la banda comprendida entre 100 y 800 Hz, lo cual tiene su lógica si se piensa que nuestro sentido auditivo es el resultado de la evolución natural en una especie como la nuestra, en la que la supervivencia y el éxito se fundamenta en la intercomunicación hablada entre los individuos del grupo, siendo esta banda la que aglutina el mayor número de sonidos propios del habla.

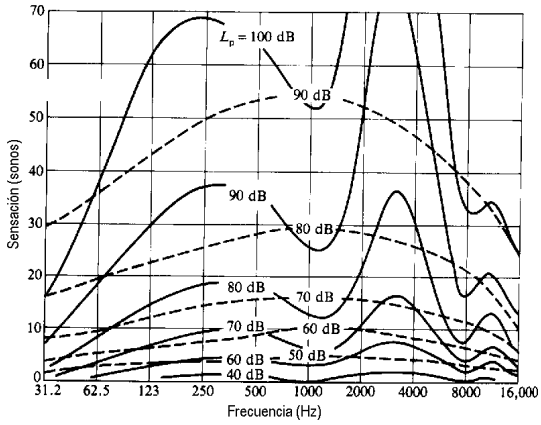



**Figura 11**: Curvas sónicas representativas de la sensación producida por tonos puros (trazo continuo) y tonos complejos de cinco armónicos (líneas de trazos) a lo largo de las frecuencias del espectro audible, para diversos niveles de presión $L_P$ (dB).
Adaptada de Crocker, 1998.

**Demostración 4:** *La escala loudness o de las sensaciones acústicas.*
*Loudness.*

## Conclusiones

El oído humano es un sistema complejo y miniaturizado cuya finalidad es captar y concentrar las ondas de presión para convertirlas en impulsos nerviosos. Si bien las energías requeridas para su excitación son mínimas, lo más portentoso del oído es su eficacia en la detección de las diferentes frecuencias y su capacidad para discernir entre sus distintos valores.

Forma un conjunto indisoluble con el cerebro aportando a este los impulsos nerviosos auditivos

que luego se transforman en sensaciones acústicas. Su funcionamiento responde a las leyes físicas si bien su complejidad hace difícil el establecimiento de un modelo científico sencillo sobre el que elaborar leyes que puedan expresarse en ecuaciones matemáticas (igualmente sucede con el resto del cuerpo humano).

No puede abordarse el estudio del fenómeno auditivo desde un punto de vista netamente físico que se refiera únicamente al oído. Es preciso considerar en su conjunto el sistema auditivo, en el que también interviene el cerebro. Este último se rige por leyes psicológicas que nada tienen que ver con la Física y ello hace arduo el estudio del problema de la audición.

## 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 os 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., Mexico.
MERINO, M. (1998) "Some difficulties in teaching the properties of sound", *Phys. Educ.,* 33, 2, pp. 101-104
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 autopresentación; 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.

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

# Descubriendo pifias científicas en el cine

**Alfonso Jesús Población Sáez**
Dpto. de Matemática Aplicada. Universidad de Valladolid

Nunca como ahora los ciudadanos hemos podido acceder a todo tipo de información con tanta facilidad, en particular en cualquier aspecto relacionado con la ciencia y la investigación científica. Revistas, blogs, audiovisuales, páginas web, son sólo algunos recursos de los que disponemos, muchos de los cuales producimos aquí, sin necesidad de importar artículos o traducciones de autores externos. Parece que estamos en condiciones de lograr una divulgación rigurosa y de calidad. Sin embargo algo estamos haciendo mal. El aumento en nuestra sociedad de creencias y aficiones por temas paranormales y seudocientíficos es una evidencia, y lo que es más paradójico y preocupante, calando incluso en jóvenes universitarios.

## Introducción

No cabe duda que prácticamente desde la proyección de la primera película, el cine se ha constituido en uno de los espectáculos más atractivo y demandado por la sociedad. Paralelamente a su faceta de entretenimiento, consigue acercarnos a conocimientos culturales de todo tipo que posiblemente nunca hubiéramos conocido de otro modo. El cine es arte y cultura. Pero, ¿también cultura científica?

Son muchas las personas que ponen el grito en el cielo cuando aparecen en pantalla anacronismos o inexactitudes históricas, literarias, artísticas, geográficas, etc. Sin embargo poca importancia se da ante el gran número de errores (a veces barbaridades) de naturaleza científica, la mayor parte de las veces por pasar inadvertidos o sencillamente por ser considerados excesivamente técnicos y por tanto, "disculpables". Desgraciadamente su reiteración los acaba convirtiendo en verdades que alimentan creencias seudocientíficas, circunstancia fuertemente arraigada en nuestra sociedad.

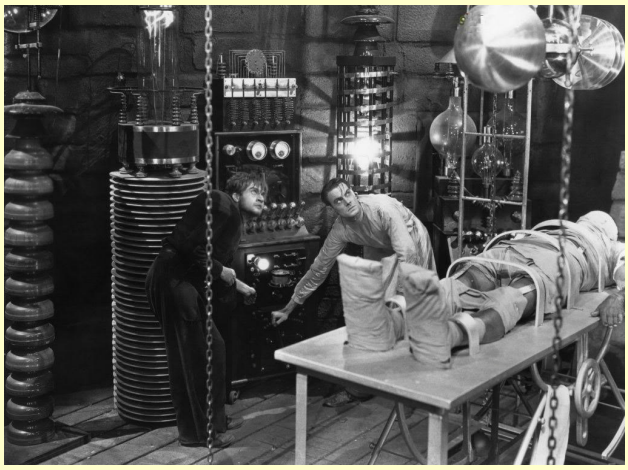
No se trata de quitar el encanto en aventuras fantásticas o de ciencia ficción, ni que dejemos de divertirnos gracias a los espectaculares efectos especiales que hacen posibles determinadas escenas, sino de plantearnos interrogantes acerca de lo que vemos y escuchamos, y ser conscientes de lo que es ciencia real y lo que es ficción. Las películas así vistas son un excelente vehículo didáctico y pedagógico, y como tal ha sido tratado con cierta asiduidad. Son muchas las referencias que podríamos citar de libros y artículos realmente interesantes que algunos compañeros han venido publicando en relación a los errores que guionistas y realizadores cinematográficos cometen, fundamentalmente en aspectos relacionados con la Física. (Véanse como muestra [3], [2], [1]; el orden es subjetivo, por preferencias personales). En nuestro caso, habida cuenta de la formación matemática del autor, centraremos más la atención en algunas de las cosas que las matemáticas nos pueden aclarar. De hecho, nos centraremos en la primera parte del contenido de la conferencia, que jugando con su título, dejaremos en "**Descubriendo π, ϕ acientíficas en el Cine**".

## El Cine, la Ciencia y los Científicos

Previamente, y de un modo muy sintético, citaremos algunas características que el cine ha mostrado sobre la ciencia y los científicos. Hasta hace relativamente poco, la Ciencia en el Cine se planteaba como una actividad extra social, un tanto oscura y extraña, sólo para "iniciados" (Científicos locos, pocas biografías de científicos reales). Evidentemente el cine planteado como industria,

*Revista de Ciencias*, 2, 27-34, junio 2013
ISSN: 2255-5943

como negocio, como entretenimiento, debe ser espectacular, los argumentos y explicaciones lo más breves y diáfanos posible y en tal contexto sólo interesan aquellos científicos que puedan suponer algún tipo de amenaza o que puedan descubrir algo sensacional. Un matemático con sus ecuaciones y algoritmos poco puede hacer frente a un doctor *Frankenstein*, alguien que pueda destruir el mundo o que descubra cómo viajar en el tiempo.



El Dr. Frankenstein en su laboratorio.

Concretamente en el cine de Hollywood, el que más se ha difundido y visionado, la ciencia es irrelevante, significa problemas, es un "reflejo laico de mentes cerradas, y sólo las personas de mente abierta encuentran la verdadera solución". No me resisto a este respecto a traer a colación aquella famosa frase de Richard Feynman: "*Hay que tener la mente abierta. Pero no tanto como para que se te caiga el cerebro*".

Con la amenaza nuclear, la aparición de platillos volantes, o las funestas consecuencias de la radiación, el cine comienza a dar entrada a los científicos en torno a la década de los cincuenta del siglo pasado. La conquista espacial y el posterior cine de catástrofes vuelven a poner de relieve su papel, si bien como meros comparsas o sencillamente asesores secundarios. No es hasta los años ochenta cuando surgen científicos "normales", incluso alguno llega a ser protagonista y en algunos casos HÉROE (aunque en algunos casos su proceder diste mucho de ser realmente "científico"), como el arqueólogo y profesor universitario *Indiana Jones*, la astrofísica Arroway en *Contact*, la científica escéptica de *Expediente X*, la antropóloga forense de *Bones* o los detectives forenses de *CSI*, por poner ejemplos entre los más populares. Eso si hablamos de científicos medianamente serios, porque caso aparte merecen aquellos despistados y un tanto esperpénticos de numerosas comedias, como el doctor Fulton (Cary Grant) de *Me siento rejuvenecer* (*Monkey Business*, Howard Hawks, EE. UU., 1952) ampliamente superado por el colega de la imagen posterior.

El rompetechos doctor Fulton ...

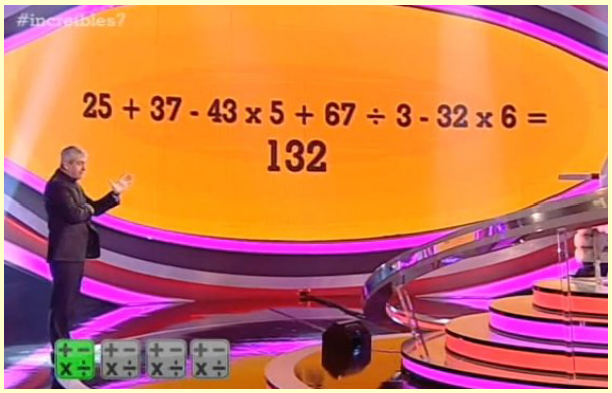
... y quien realmente descubrió cómo rejuvenecer.

Así pues, por regla general (hay honrosas excepciones), en el cine comercial se suceden las imprecisiones y errores, se desprecian las leyes matemáticas y científicas, los asesores científicos figuran pero se "pasa" de ellos y se promociona lo sobrenatural bajo un barniz de ciencia. Tampoco ayudan mucho en la divulgación científica otros medios de comunicación como las cadenas de televisión, la prensa escrita, las cadenas de radio (también con excepciones), etc. Una pequeña muestra que deja patente que no hay que rebuscar demasiado. Hace unas semanas se presentó un nuevo concurso en una cadena generalista. Se presentaba como un desafío que "*pone a prueba a los participantes a través de complicados ejercicios de cálculo, memoria y pruebas de destreza y habilidad*". En una de ellas se reta a realizar siete operaciones matemáticas en veinte segundos. Y aparece una imagen que muestra:

$$25 + 37 - 43 \times 5 + 67 \div 3 - 32 \times 6 =$$

Como todo el mundo sabe desde Primaria, sólo los signos "más" y "menos" separan términos. Eso significa que, en ausencia de paréntesis (como es el caso), primero hay que efectuar las multiplicaciones y divisiones, y después sumas y restas, lo que nos lleva a que la operación anterior da como resultado $-968/3$, (–322.666666...; en modo aproximado; compruébese, si se desea, con cualquier programa de cálculo o calculadora científica), y no 132 como aseguran en el programa. Para obtener ese valor, hubiera sido necesario escribir

((((((25 + 37) – 43)) x 5) + 67) ÷ 3 – 32) x 6.



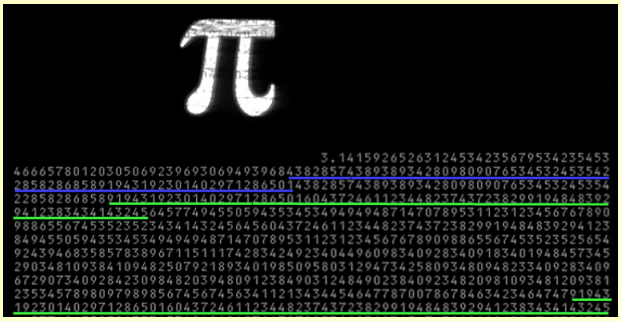

Enmendando los libros de texto.

Quizá por ello el concursante tardó tanto en responder ("*has contestado rozando el poste*", comentó con sorna el presentador; las sucesivas preguntas del mismo estilo, las respondió a los pocos segundos). Por supuesto ante las reiteradas quejas al programa por parte de diferentes personas para que se rectificara, la única respuesta fue borrarlas de sus páginas web y de las redes sociales. Y desgraciadamente cala más en la sociedad lo que sale por los medios de comunicación que la verdad (¡en todos los órdenes!).

## La "maldición" de π

Comenzamos nuestro repaso con la película *PI, Fe en el Caos* (EE.UU., 1998), una película de culto, la ópera prima de Darren Aronovsky (afamado director de *Réquiem por un sueño, El luchador o Cisne negro*, entre otras) y no es una mala película. Tiene muchos matices y es un gran recurso a la hora de proporcionar escenas para comentar. Es la historia de un matemático brillante, Max Cohen, que ha construido en su apartamento un gran ordenador (que ha bautizado como Euclides) a partir de piezas recicladas y materiales de diversa procedencia. Lo utiliza con un único fin: ha llegado al convencimiento de que cualquier sistema complejo está determinado por un mismo patrón numérico universal.

Una película con semejante título debería al menos tener la decencia de describirlo bien. Pues no. En la primera secuencia, antes de iniciar los títulos de crédito (Ver imagen), aparecen varios cientos de decimales de π. A partir del octavo dígito decimal es incorrecto: 3.14159265**2631245**... frente al verdadero valor 3.141592653589793... Pero aún más grave. π es un número irracional, esto es, posee infinitos decimales no periódicos (demostración que se remonta a Johann Lambert en 1767). En la imagen, se describen subrayados en verde los mismos números, y en azul otra secuencia a cuyo fin vuelve a comenzar idénticamente.



Incomprensibles periodos en el desarrollo decimal de π

Es más sencillo calcular los decimales correctamente sin más que utilizar alguna de las muchas identidades que se emplean para ello (algunas de las cuales se describen a continuación), que ponerlos aleatoriamente, aunque como se ha dicho de aleatorio, poco:

$$\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{2n+1}=\frac{1}{1}-\frac{1}{3}+\frac{1}{5}-\frac{1}{7}+\frac{1}{9}-\ldots=\frac{\pi}{4}$$

$$\frac{\pi}{2}=\prod_{n=1}^{\infty}\left(\frac{4n^2}{4n^2-1}\right)$$

$$\frac{1}{\pi}=\frac{2\sqrt{2}}{9801}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(4k)!(1103+26390k)}{(k!)^4 396^{4k}}$$

Otra popular película en la que este número tiene cierto protagonismo es *Cortina Rasgada* (*Torn Curtain*, Alfred Hitchcock, EE.UU., 1966). En su comercialización en DVD en nuestro país hay escenas para las que, incomprensiblemente, se ha utilizado un doblaje realizado en Hispanoamérica, mientras que en otras se ha mantenido un doblaje español. En una de ellas se dice: *Pi es el radio de la circunferencia de un círculo por su diámetro*. En la versión que TVE ha emitido en diferentes ocasiones, el doblaje es uniforme, sólo en español sin cambio alguno de voces. La misma escena se presenta así: *Pi es la relación entre el radio y el perímetro de una circunferencia*. La versión original en inglés dice lo siguiente: *Pi is the ratio of the circumference of a circle to its diameter*. Evidentemente la primera es un disparate provocado por la mala traducción de

"ratio" como radio en vez de "relación" o "proporción". La segunda no es incorrecta si obviamos factores, pero no se entiende a ton de qué no se emplea la de la versión original que responde a $L = \pi\, d$, siendo $L$ la longitud de la circunferencia y $d$ su diámetro. No se trata de una excepción: muchos doblajes son incorrectos no siéndolo la versión original.

El cálculo de decimales de π a lo largo de la Historia ha sido una afición que aún perdura. En la actualidad el récord lo ostenta el equipo de informáticos dirigido por Alexander Yee y Shigeru Kondo, con $10^{13}$ dígitos, aunque su cálculo no tiene mayor utilidad que poner a prueba los límites de la computación, o demostrar su error a aquellos iluminados que cada cierto tiempo aparecen diciendo haber encontrado una periodicidad en la expresión decimal. Lo que podemos realizar a partir de la expresión decimal, como mero divertimento, es demostrar a los incrédulos que gracias a su irracionalidad, es posible localizar CUALQUIER secuencia finita de dígitos tarde o temprano, siempre que dispongamos del número suficiente de decimales, por supuesto. Así puede probarse que nuestro número de teléfono, la clave secreta de nuestra tarjeta de crédito, o si pasáramos a cifras (por ejemplo asignando a cada letra su posición en el alfabeto) cualquier novela escrita o por escribir, *el Quijote*, por ejemplo, aparecerá tal cual en la expresión decimal de π a partir de algún punto. Este argumento puede ayudarnos a comprender el escurridizo concepto de infinito. En la página web *The Pi-Search Page* aparece una base de datos con 200 millones de cifras decimales de π que permite buscar cualquier cadena de números de hasta 120 dígitos. Una secuencia de cinco dígitos aparece con seguridad; si fuera de seis dígitos, la probabilidad de encontrarla está cerca de la unidad; para ocho cifras el porcentaje se sitúa en el 63%; para nueve dígitos en el 9,5%; y así sucesivamente. Pero esta propiedad no es exclusiva de π: cualquier número irracional la cumple, como *e*, las raíces cuadradas de cualquier natural que no sea cuadrado perfecto, etc.

π según la factoría Disney

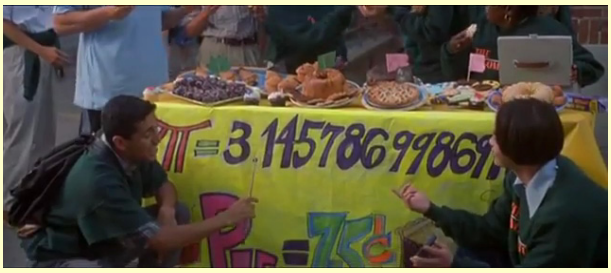
π es con diferencia la constante que más aparece en el cine, aunque en la mayor parte de los casos, con muy mala fortuna (de ahí el título que encabeza el párrafo). En el documental *Donald en el país de las Matemáticas* (*Donald in Mathmagic Land*, Hamilton Luske, EE.UU., 1959) un pájaro formado por la yuxtaposición de un círculo, un triángulo y un rectángulo, indica que su valor es el indicado en la imagen (el valor correcto es 3.14159265358979323 84...).

En la horrenda *Nunca me han besado* (*Never been kissed*, Raja Gosnell, EE.UU., 1999) no se molestan más que en colocar dos dígitos correctos.

En la siguiente imagen, de la película *Las vírgenes suicidas* (*The Virgin Suicides*, Sofia Coppola, EE.UU., 1999), se observa de nuevo sobre la pizarra la expresión decimal de π: 3.14159265359429876428 56.... Pero todo es empeorable.

El padre matemático de *Las vírgenes suicidas*.

En la española *Y decirte alguna estupidez, por ejemplo, te quiero* (Antonio del Real, 1999) preguntado un alumno por el personaje histórico más célebre, responde: "*Los matemáticos en general. En especial el que inventó el número π. Pitágoras creo que fue. 3.502622*". Aunque tiene su disculpa. El chico pretendía comunicar a toda la clase el número de teléfono de la chica más "aplicada". Hasta los hay que utilizan π para comunicarse con los "marcianos" (*Marte, el planeta rojo* (*Red Planet Mars*, Harry Horner, EE. UU., 1952)).

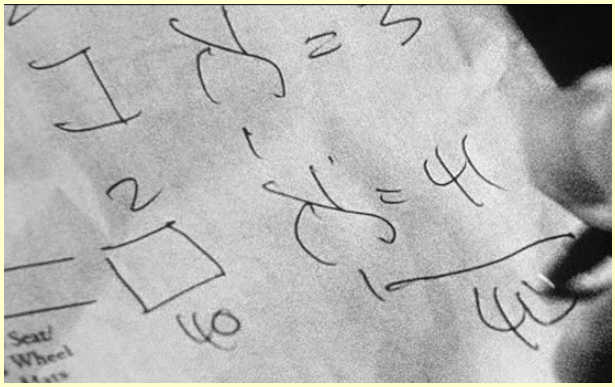


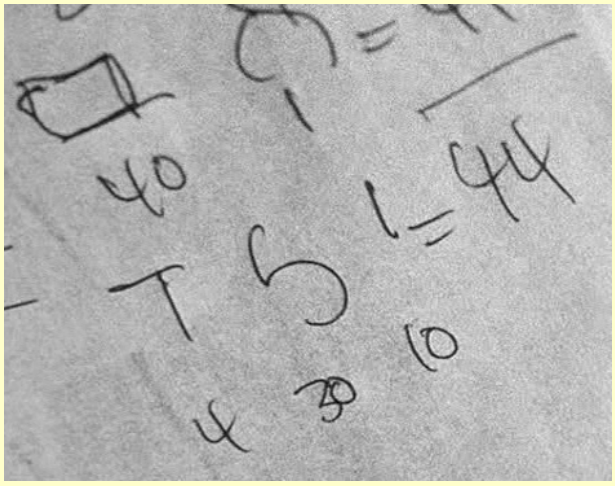
Cartel poco afortunado en *Nunca me han besado*.

Existen muchas más referencias en el cine a este número, pero lo dejamos aquí. Simplemente recomendar al lector el ilustrativo cortometraje *Pipas Pi Pilar*, disponible en el enlace del hipervínculo.

## Numerología

A Max, el protagonista de *Pi (Fe en el Caos)*, le acosan por un lado un grupo de financieros de Wall Street que pretenden obtener esa fórmula genial que busca porque les permitirá ejecutar sus operaciones bursátiles sobre seguro, y por otro, por los miembros de la secta judía Hasidica que a través del estudio cabalístico de la Torah (libro sagrado de los judíos) tratan de alcanzar a conocer la verdadera naturaleza de Dios, expresada, según ellos, por una secuencia de 216 números. Aparece aquí un nuevo ejemplo de creencia que utiliza los números y ciertas "propiedades cualitativas" de los mismos.





La cábala es una de las prácticas más antiguas del misticismo judío, que se remonta a la época de Moisés, cuando, según la tradición, recibió oralmente de Dios las consignas que originarían los diez mandamientos. El principio fundamental de la tradición cabalística es la creencia en la divinidad de los cinco primeros libros de la Biblia (la *Torah*) a través de cuyo estudio aseguran que pueden averiguarse los secretos de la creación. ("*La Torah es una larga cadena de números. Algunos dicen que es un código que nos ha enviado Dios*", dice Lenny Meyer, un judio hasidico, a Max). Lenny Meyer trata de explicar a Max porqué funcionan estas prácticas. En hebreo "Padre" es *Ab* (en la imagen escribe las letras Beth y Aleph, a las que se asignan numéricamente los valores, 2 y 1, respectivamente; sumadas nos dan 2 + 1 = 3), "Madre" es *Am* (en la imagen, las letras Mem y Aleph, 40 + 1 = 41). Al sumar Padre y Madre, se obtiene 3 + 41 = 44, y resulta que "Hijo" se dice *Yeled* (letras Daleth, Lameth, Yod, con valores, 4 + 30 + 10, respectivamente; las vocales no cuentan) cuya equivalencia es también 44. Posteriormente hace lo mismo con *Kadem* (jardín del Edén) y árbol del conocimiento, que dan numéricamente 144 y 233, respectivamente, dos *números de Fibonacci*, lo cual, afirma, "*no puede ser casual*".

| GREEK | | | HEBREW | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Α, α | Alpha (A) | 1 | א | Aleph (A, E) | A |
| 2 | Β, β | Beta (B) | 2 | ב | Beth (B, V) | B |
| 3 | Γ, γ | Gamma (G) | 3 | ג | Gimel (G) | G |
| 4 | Δ, δ | Delta (D) | 4 | ד | Daleth (D) | D |
| 5 | Ε, ε | Epsilon (E) | 5 | ה | He [Heh] (E, A) | H |
| 6 | F, F | Digamma (V, W) | 6 | ו | Vau (O, U, V, W) | V |
| 7 | Ζ, ζ | Zeta (Z) | 7 | ז | Zayin (Z) | Z |
| 8 | Η, η | Eta (Ē) | 8 | ח | Cheth (Ch) | Ch |
| 9 | Θ, θ | Theta (Th) | 9 | ט | Teth (T) | T |
| 10 | Ι, ι | Iota (I) | 10 | י | Yod (I, J, Y) | I |
| 20 | Κ, κ | Kappa (K) | 20 | כ | Kaph (K, Kh) | K |
| 30 | Λ, λ | Lambda (L) | 30 | ל | Lamed (L) | L |
| 40 | Μ, μ | Mu (M) | 40 | מ | Mem (M) | M |
| 50 | Ν, ν | Nu (N) | 50 | נ | Nun (N) | N |
| 60 | Ξ, ξ | Xi (X) | 60 | ס | Samekh (S) | S |
| 70 | Ο, ο | Omicron (O) | 70 | ע | A'ayin (A'a, O) | O |
| 80 | Π, π | Pi (P) | 80 | פ | Pe (P, Ph) | Ph |
| 90 | ϙ | Coph (Q) | 90 | צ | Tzaddi (Tz) | Tz |
| 100 | Ρ, ρ | Rho (R) | 100 | ק | Qoph (Q) | Q |
| 200 | Σ, σ, ς | Sigma (S) | 200 | ר | Resh (R) | R |
| 300 | Τ, τ | Tau (T) | 300 | ש | Shin (Sh, S) | Sh |
| 400 | Υ, υ | Upsilon (Y, U) | 400 | ת | Tau (Th, T) | Th |
| 500 | Φ, φ | Phi (Ph) | 500 | ך | Kaph-final (K,Kh) | K |
| 600 | Χ, χ | Chi (Ch) | 600 | ם | Mem-final (M) | M |
| 700 | Ψ, ψ | Psi (Ps) | 700 | ן | Nun-final (N) | N |
| 800 | Ω, ω | Omega (Ō) | 800 | ף | Pe-final (P, Ph) | Ph |
| 900 | ϡ | Sanpi | 900 | ץ | Tzaddi-final (Tz) | Tz |

Todo ello responde a una variedad de la cábala simbólica denominada *gematría* o *numerología*. Con las equivalencias numéricas de los alfabetos clásicos (latino, griego y hebreo) hay personas que pretenden interpretar qué ocultos mensajes esotéricos o adivinatorios se encuentran en palabras, frases y textos. Los griegos anteriores a Pitágoras ya se entretuvieron con estas prácticas, y del mismo modo los cristianos identificaron al emperador romano Nerón con el anticristo ya que su nombre equivalía al famoso 666. Los protestantes lo dedujeron de los Papas, los católicos se lo endosaron a Lutero y Calvino, y personajes clave de la Historia como Napoleón, Hitler, Mussolini, Stalin, y otros célebres dictadores y gobernantes han ido incorporándose al citado número.

Hasta aquí lo que dicen la mayor parte de libros, artículos y charlatanes varios. Pero si uno se toma la molestia de echar cuentas, éstas no salen casi nunca. ¿Nos mienten? No, pero hacen algunas trampas. Veamos algunos ejemplos:

1.- En hebreo, César Nerón se dice "qsr nrwn". Según las equivalencias de dicha lengua:
QSR NRWN = 100 + 60 + 200 + 50 + 200 + 6 + 50 = 666

2.- Llama la atención que se diga que todos los Papas de la historia tengan asociado el 666. La "prueba" se expresa así:
VICARIVS FILII DEI = 5 + 1 + 100 + 1 + 5 + 1 + 50 +1 + 1 + 500 +1 = 666. Esa expresión traducida del latín es "representante del Hijo de Dios", y como vive en Roma, lo que se sustituyen son los números romanos de la frase (cambiando la "U" de Vicarius por una V, aunque esto era también una costumbre romana) por sus equivalente numéricos. Esta equivalencia no es muy antigua. Se atribuye a Ellen Gould White, la controvertida fundadora de la Iglesia Adventista del Séptimo Día. Casualmente, si uno hace lo mismo con su nombre (cambiar las letras con equivalencia romana por su valor), obtiene 50 + 50 + 5 + 50 + 500 + 10 + 1 = 666. Aunque no está de más apuntar que para la Iglesia Católica, el Papa es "Vicarius Christi", no "Vicarius Filli Dei".
3.- ¿Y Hitler? Bueno pues resulta que para Hitler lo que debemos emplear es el código A = 100, B = 101, C = 102,.... Así
HITLER = 107 + 108 + 119 + 111 + 104 + 117 = 666.

4.- León Tolstoi explica perfectamente en el capítulo XIX del tercer volumen de *Guerra y Paz* los diferentes cambalaches que hay que hacer para que *Napoléon* sea equivalente a 666. En principio las equivalencias empleadas deben ser a = 1, b = 2, c = 3, d = 4, e = 5, f = 6, g = 7, h = 8, i = 9, k = 10 (hasta aquí todo normal, pero, de repente), l = 20, m = 30, n = 40, o = 50, p = 60, q = 70, r = 80, s = 90, t = 100, u = 110, v = 120, w = 130, x = 140, y = 150, z = 160. Así,
L'EMPÉREUR NAPOLÉON=20+5+30+60 +5+ 80+5+110+80+40+1+60+50+20+5+50+40 = 661. "¡*Oh, no*! ¡*No sale*!". Bueno pues le pegamos una patada al correcto francés y le ponemos
LE EMPÉREUR NAPOLÉON=20+5+5+30+60+5+ 80+5+110+80+40+1+60+50+20+5+50+40 = 666.
Y además con "*quarante-deux*" (cuarenta y dos) también tenemos 666. Y es que el 42 también fue crucial en la vida del emperador. Por cierto, ¿nadie echó en falta la j en el código anterior?

5.- ¿Recuerdan a Henry Kissinger, secretario de Estado durante los mandatos presidenciales de Richard Nixon y Gerald Ford, entre 1969 y 1977? Pues KISSINGER = 666, con a = 6, b = 12,..., múltiplos de 6.

6.- Pero es que también JESUS = 666 (con A = 9, B = 18,…… múltiplos de 9)

En resumidas cuentas, es posible obtener 666 (y cualquier otra cifra) con el código y el ingenio apropiados. Así no es de extrañar que Nicholas Cage, brillante astrofísico en *Señales del Futuro* (*Knowing*, Alex Proyas, EE. UU., 2009) sea capaz de darle sentido en forma de fechas de grandes desgracias sobre la humanidad (bueno, sobre los EE. UU., que al parecer viene a ser lo mismo) a una ristra de números (¿Porqué no probó con los dígitos deπ? Ahí está todo). Y esto, desgraciadamente, no sólo es una tontería peliculera. En 1997, Michael Drosnin publicó *El código secreto de la Biblia*, (en 2005 hizo una segunda parte, dado el éxito de ventas) en el que afirma que la Biblia contiene mensajes ocultos que pueden descubrirse buscando secuencias de letras equidistantes (sistema que en criptografía se conoce como EDLS, *Equidistant Letter Sequences*). Un EDSL se encuentra tomando cualquier texto, eligiendo una letra inicial cualquiera y luego avanzando cada vez un número determinado de letras. Así Drosnin descubre en la Biblia los asesinatos de Kennedy o de Anuar el Sadat, la relación entre Newton y la gravedad, etc. La trampa está en que en un texto tan extenso se puede hacer aparecer cualquier cosa, y más aún si como él, se varía a voluntad el punto inicial y el paso de los avances. Así, Brendan McKay encontró las mismas "revelaciones" en *Moby Dick*. Por otra parte los textos hebreos están en gran medida libres de vocales, y estos inteligentes intérpretes las insertan a conveniencia con lo cual cualquiera, sin ser excesivamente listo, puede hacer predicciones. ¿Se animan?

Nicholas Cage entreteniéndose en *Señales del Futuro.*

## Hexakosioihexekontahexafobia

Esta larga palabreja define el rechazo que experimenten muchas personas hacia el número 666 o cualquier cosa que pueda estar relacionada directa

o indirectamente con él (hay otra más sencilla, *trihexafobia*), del mismo modo que otros (o quizá los mismos) padecen *triscaidecafobia* (fobia al número 13). Si antes contemplábamos malabarismos diversos para obtener tal número, lo cierto es que aparece en múltiples expresiones:

1.- La suma de los primeros 36 naturales (por tanto la suma de los números de la ruleta) es

$$1 + 2 + 3 + 4 + \ldots\ldots + 35 + 36 = 666$$

Como consecuencia 666 es el trigésimo sexto número triangular.

2.- La suma de los cuadrados de los siete (otro número "místico") primeros números primos

$$2^2 + 3^2 + 5^2 + 7^2 + 11^2 + 13^2 + 17^2 = 666$$

3.- La suma de los 144 primeros decimales de $\pi$ es 666. Obsérvese además que 144 = (6+6) x (6+6).

4.- La siguiente suma de cubos (justamente hasta 6 x 6 x 6 = $6^3$)

$$1^3 + 2^3 + 3^3 + 4^3 + 5^3 + 6^3 + 5^3 + 4^3 + 3^3 + 2^3 + 1^3 = 666.$$

5.- $6 + 6 + 6 + 6^3 + 6^3 + 6^3 = 666.$

6.- $1^6 - 2^6 + 3^6 = 666.$

7.- El seno del ángulo de 666º multiplicado por (–2) es igual a la proporción áurea:

$$-2 \text{ sen } 666 = \varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1.6180339887\ldots.$$

8.- El número romano que representa el 666 (DCLXVI) usa una vez cada una de las cifras romanas de valor menor que 1.000, en orden descendente respecto a su valor. Si sumamos sus valores numéricos (D = 500, C = 100, L = 50, X = 10, V = 5, I = 1), obtenemos 500 + 100 + 50 + 10 + 5 + 1 = 666.
Los valores faciales de los billetes de algunos países son precisamente esos (500, 100, 50, 10, 5 y 1).

9.- Seis neutrones, seis protones y seis electrones componen el átomo de carbono que forma parte de todos los compuestos orgánicos existentes y, por consiguiente, de los tejidos orgánicos del cuerpo humano.

10.- Un cuadrado mágico es aquel en el que todas las filas, columnas y diagonales principales suman la misma cantidad, la constante mágica. En el cuadrado adjunto esa constante es 666. Todos los números que aparecen en dicho cuadrado son números primos.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 107 | 5 | 131 | 109 | 311 |
| 7 | 331 | 193 | 11 | 83 | 41 |
| 103 | 53 | 71 | 89 | 151 | 199 |
| 113 | 61 | 97 | 197 | 167 | 31 |
| 367 | 13 | 173 | 59 | 17 | 37 |
| 73 | 101 | 127 | 179 | 139 | 47 |

No es difícil llegar a 666 expresiones que contengan dicho número, pero eso excedería el límite razonable de extensión de este artículo. Evidentemente desde el punto de vista matemático todo esto no son más que CURIOSIDADES sin importancia alguna que podríamos obtener con cualquier otra cifra. No obstante para dejar constancia del anumerismo (véase [4]) de la sociedad las anécdotas respecto a este número no paran. Una de las más recientes tiene que ver con la siguiente cita (Apocalipsis 13, 17): "*en el futuro, nadie podrá comprar ni vender si no es con el número de la Bestia*"

Si observamos el alfabeto hebreo, tanto a la U, como a la V y a la W se le asocia el valor numérico 6. En algunos textos romanos una forma de escribir VI era W. Relacionando ambas ideas, obtenemos que World Wide Web: www = 666.

Sin embargo nadie ha conseguido justificar la razón por la que a veces los números se suman, otras sencillamente se adjuntan, otras se cuentan letras,...., en definitiva, lo que conviene en cada momento. Ahora lo que está claro es que no se te ocurra sacar un triple seis jugando al parchís.

Para añadir un poco más de escepticismo, en 1985 un grupo de arqueólogos británicos que realizaban excavaciones en la ciudad egipcia de Oxyrhynchus descubrieron en una escombrera a unos diez metros de profundidad, numerosos fragmentos de papiros que rápidamente trasladaron a Oxford para su análisis. En 1999, los primeros resultados sobre el estudio de estos documentos desvelaron que uno de estos pergaminos correspondía al Apocalipsis de Juan, escrito en el siglo III. Estos fragmentos también revelaron que el número que nos ocupa, el que representa a la marca de la bestia, no era el 666, sino el 616. Tres letras aparecen con claridad: JI que representa 600, IOTA que representa el 10 y SIMA que representa el 6. O sea que habrá que rehacer las cuentas...

A pesar de lo inverosímil de todo lo relatado, algunas personalidades no esconden sus manías. Ronald

Reagan y su señora, Nancy Reagan, en 1989, cuando se mudaron a su casa en Bel Air (Los Ángeles), cambiaron su dirección de 666 St. Cloud Road al 668 por su fobia a ese número. ¿Sería porque su nombre, Ronald Wilson Reagan, tenía 6-6-6 letras?

Max Cohen en *Pi (Fe en el Caos)* buscaba la secuencia de 216 cifras que encierra el nombre de Dios, que explica la existencia humana, etc. ¿Se han fijado que 216 = 6 x 6 x 6? También hay una cierta obsesión con el número 23, que dicen que aparece en cualquier sitio. Hasta una película de Jim Carrey (*El número 23* (Joel Schumacher, EE. UU., 2007)) trata de esto mismo. ¿Será por que 2/3 = 0.666...?

En fin, finalicemos con un pasatiempo, que es más productivo para nuestras neuronas. Hay que encontrar la suma encerrada en el siguiente criptograma (letras diferentes se corresponden con números distintos, y números iguales viene expresados por las mismas letras)

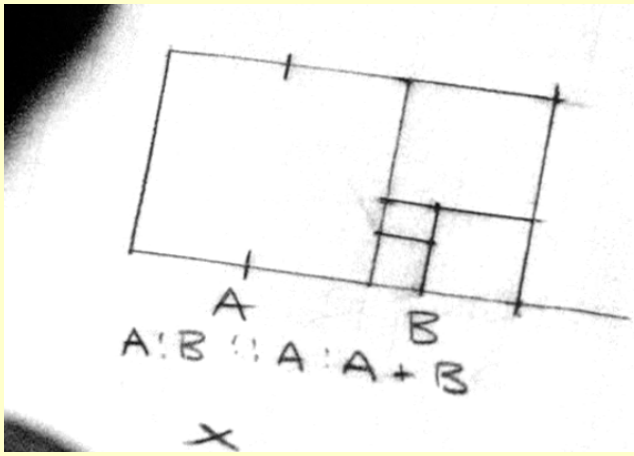
SIX + SIX + SIX = NINE + NINE

## PI (la película) aún da para más

Construyendo un rectángulo áureo para luego subdividirlo en otros y dibujar una espiral, Max escribe la relación que se aprecia en la imagen. ¿Qué tiene de particular?

$\frac{A}{B} = \frac{A}{A+B}$, de donde $\frac{1}{B} = \frac{1}{A+B}$, y de ahí $A+B=B$, y entonces $A=0$. ¡¡Nos quedamos sin rectángulo!! Una nueva pifia. Debería haberse puesto

$\frac{A}{B} = \frac{A+B}{A}$ para obtener $1 + \frac{1}{\phi} = \phi$, y deducir el número áureo $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$.




La película aporta después correctamente una gran cantidad de ejemplos donde $\phi$ está presente (Geometría, Naturaleza, Arquitectura, Pintura, Objetos cotidianos (DNI, DIN A4, Pantalla panorámica, etc.)). Las relaciones entre $\phi$, la sucesión de Fibonacci, no sólo en Geometría, sino también en la Física, cálculos de límites, sumas y productos infinitos, probabilidades, la Naturaleza,.... son innumerables, y para entonces el público asistente a la conferencia ya mostraba, como seguramente el lector de estas líneas, cierto cansancio numerológico. Fue el momento de pasar a otros tipo de pifias cinematográficas de carácter seudocientífico como la peligrosidad de las microondas, las imposibles andanzas de los fantasmas del cine, las contradictorias existencias de vampiros, zombies y demás fauna de moda o los inverosímiles desplazamientos aéreos de reptiles voladores con presas humanas entre sus garras (independientemente de su absurda coexistencia o su disparatada clonación). En [1], [2], [3] pueden encontrarse algunas explicaciones a estos "fenómenos". En [5] y [6] se detallan otras cuestiones de tipo matemático en el Cine, por si algún lector se ha quedado con ganas de más.

## Referencias

[1] Barral, Miguel. *Que la Ciencia te acompañe*. Editorial Porquoui. 2008.
[2] Kaku, Michio. *Física de lo Imposible*. Editorial Debate. 2009.
[3] Moreno, Manuel; José, Jordi. *De King Kong a Einstein. La Física en la Ciencia Ficción*. Ediciones UPC. Barcelona, 1999.
[4] Paulos, John Allen. *El hombre anumérico*. Tusquets Editores, Barcelona, 3ª edición, 1990.
[5] Población Sáez, Alfonso J. *Las matemáticas en el cine*. Proyecto Sur de Ediciones – RSME. Granada, 2006.
[6] Población Sáez, Alfonso J. Sección *Cine y Matemáticas* del portal *Divulgación de las Matemáticas* de la RSME (DivulgaMAT).

# Las lunas de Júpiter

**Daniel Camarero Muñoz**
Grupo Universitario de Astronomía

Si las Voyager nos enviaron descubrimientos impactantes, en 1979, como el vulcanismo de Io, las pocas observaciones que realizó la sonda Galileo al sistema de Júpiter, aunque afectadas por anomalías de la misión y reducidas respecto a las expectativas iniciales, fueron suficientes para advertir que las lunas heladas esconden el mayor interés de la exploración del sistema solar: agua bajo una superficie helada; éste es el caso de Europa que ha pasado a ser considerado objetivo de alto interés.

## Introducción

Júpiter es uno de los planetas del Sistema Solar con más historia. Ya era conocido por los griegos, quienes le dieron la categoría de Dios. Sin embargo, no se le puede atribuir un descubridor, ya que éste puede ser observado a simple vista en determinados momentos del año.

Para descubrir la primera de sus lunas tuvimos que esperar hasta el año 1610. Fue Galileo quien dirigiendo su rudimentario telescopio hacia Júpiter, pudo ver que le acompañaban 3 cuerpos. Días

*Revista de Ciencias*, 2, 35-40, junio 2013
ISSN: 2255-5943

después con su empeño, descubrió uno más, no podían ser estrellas, pues había observado que orbitaban alrededor del planeta, por lo que les otorgó la categoría de satélites, los primeros que orbitaban un cuerpo diferente a la Tierra o al Sol.

A partir de finales del siglo XIX, un gran número de estas lunas han sido descubiertas.

Las naves "Voyager" también colaboraron en el estudio del sistema de Júpiter. En 1996 se puso en marcha el proyecto "Galileo", dedicado a profundizar el estudio de los satélites de ese sistema. Las observaciones realizadas hasta la fecha por el proyecto Galileo, han permitido que hasta el año 2011 se puedan contabilizar un total de 67 satélites, número que, desde entonces, sigue aumentando.

En la imagen, dos telescopios de Galileo conservados (Museo de Historia de la Ciencia de Florencia)

## Observar los satélites de Júpiter

Las cuatro lunas más grandes fueron descubiertas por Galileo, que según el orden de su distancia a Júpiter son: Ío, Europa, Ganímedes y Calisto; de ahí el nombre de galileanos.

A pesar de lo que mucha gente cree, bastan unos simples prismáticos para seguir el movimiento, durante unas horas, de las cuatro principales lunas. Además, muchas revistas de astronomía publican cada mes la posición de dichos satélites, por lo que sin ayuda de telescopio, con los prismáticos podemos identificarlos perfectamente. Tanto es así que en el siglo XVII Ole Romer utilizó los desfases de tiempo en sus ocultaciones sobre Júpiter para medir la velocidad de la luz con gran precisión para la época.

Su tamaño oscila entre 0,9 y 1,5 veces el de nuestra Luna. Cada una tiene una personalidad distinta y todas giran alrededor de Júpiter en órbitas casi circulares y en un plano cercano al nivel del ecuador del planeta. En todo caso, una larga lista de satélites están siendo descubiertos; sólo a modo de indicación, y por orden de proximidad al planeta, los satélites más cercanos son los siguientes:

| Nombre | Fecha | Diámetro (km) | Masa (kg) | Radio orbital (km) |
|---|---|---|---|---|
| **Metis** | 1979 | 43 | $1{,}2\times10^{17}$ | 128.000 |
| **Adrastea** | 1979 | 26×20×16 | $7{,}5\times10^{15}$ | 129.000 |
| **Amaltea** | 1892 | 262×146×134 | $2{,}1\times10^{18}$ | 181.400 |
| **Tebe** | 1979 | 110×90 | $1{,}5\times10^{18}$ | 221.900 |
| **Ío** | 1610 | 3643 | $8{,}9\times10^{22}$ | 421.800 |
| **Europa** | 1610 | 3122 | $4{,}8\times10^{22}$ | 671.100 |
| **Ganímedes** | 1610 | 5262 | $1{,}5\times10^{23}$ | 1.070.400 |
| **Calisto** | 1610 | 4821 | $1{,}1\times10^{23}$ | 1.882.700 |
| **Temisto** | 2000 | 8 | $6{,}9\times10^{14}$ | 7.284.000 |
| **Leda** | 1974 | 20 | $1{,}1\times10^{16}$ | 11.165.000 |

## Las lunas galialeanas

### *Ío*

Tiene 3.643 km de diámetro y órbita a 421.800 km de Júpiter en poco más de un día y medio, su órbita se ve afectada por el campo magnético de éste y por la proximidad de Europa y Ganímedes. Posee una fina atmósfera compuesta por dióxido de azufre.
Es rocoso, con la mayor actividad volcánica de todo el Sistema Solar, muy probablemente provocada por la atracción de Júpiter, Europa y Ganímedes, que hacen que se contraiga y se dilate, sometiendo a su corteza a continuos abombamientos. Como resultado de ello, tiene más de 400 volcanes que crecen y decrecen con la actividad del mismo. Es capaz de expulsar al espacio magma a una altura de 350 km y nubes de azufre que pueden alcanzar los 500 km de altura.

Estudios en el infrarrojo, desde la Tierra, muestran que algunas regiones del satélite cubiertas por flujos de lava, alcanzan temperaturas de hasta 2.000 K (aunque las temperaturas medias registradas son mucho más frías, cercanas a los 130 K).

Cuando la sonda Voyager 1 envió las primeras imágenes cercanas de Ío en 1979, los científicos esperaban encontrar gran cantidad de cráteres cuya densidad proporcionara datos sobre la edad del satélite; en contra de lo esperado, Ío no tiene prácticamente cráteres. Ello es debido a la actividad volcánica tan intensa que ha borrado por completo las señales de cráteres provocados por impactos en su superficie.

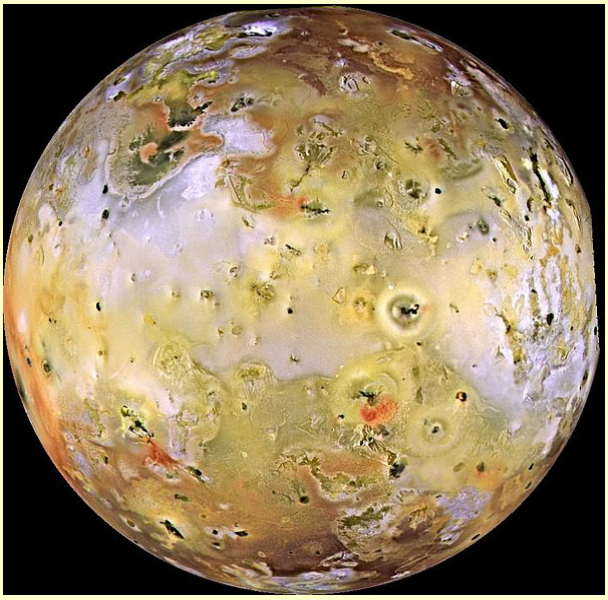


Imagen de Ío en su color verdadero, observada por la Sonda Galileo (NASA)

***Europa***

Tiene 3.122 km de diámetro y completa su órbita en tres días y medio, a 671.100 km de Júpiter. Su brillante superficie es una lisa capa de hielo de unos 100 km de espesor (hielo en la corteza y en forma de océano líquido bajo el hielo). Fue la sonda Galileo la que puso en evidencia la existencia de un océano líquido debajo del hielo.

Está compuesta por rocas de silicio mezcladas con al menos un 5% de agua. Probablemente su núcleo sea metálico (hierro), y se han observado algunos accidentes geográficos de más de cien metros de altura, lo que indica que su superficie es joven y geológicamente activa. Asimismo el telescopio Hubble ha permitido detectar una fina atmósfera de oxígeno, de origen no biológico, probablemente debido al vapor de agua que se produce por la interacción de la luz con su superficie y que, posteriormente, se divide en oxígeno e hidrógeno. El hidrógeno consigue escapar de la gravedad de Europa, pero no así el Oxígeno.

El mayor interés por Europa reside en la posibilidad de que puedan desarrollarse formas de vida acuática en las zonas más calientes de su océano, gracias al calor procedente del núcleo. Se trata de una situación también presente en nuestro planeta, en las profundidades de los océanos, cerca de las chimeneas volcánicas, como en el Lago Vostok, un lago subglacial en la Antártida.

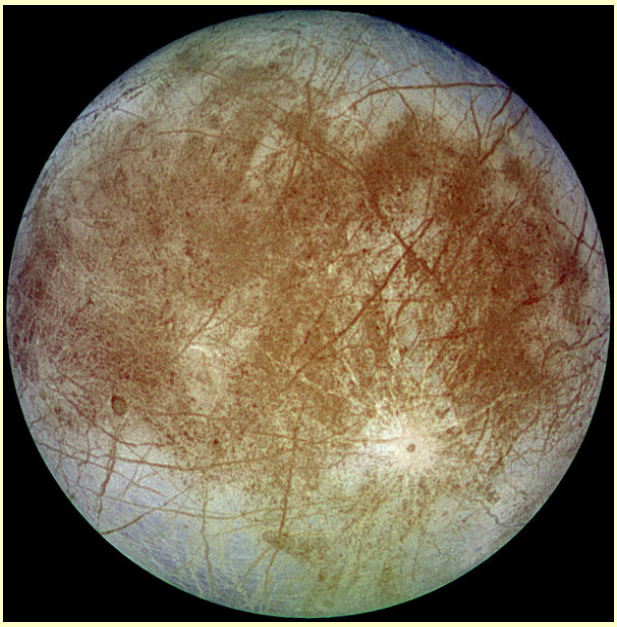


Imagen de Europa tomada el 7 de septiembre de 1996 por la nave espacial Galileo (NASA)

***Ganímedes***

Tiene 5262 km de diámetro y completa su órbita a 1.070.400 km de Júpiter en unos siete días. Es el satélite más grande de Júpiter y del Sistema Solar, de hecho, es mayor que el planeta Mercurio. También tiene un campo magnético propio (del orden del 10% de fuerza comparado con el terrestre), por lo que se cree que su núcleo puede contener metales.

Es el más brillante de los satélites galileanos. Posee una superficie helada, llena de contrastes, cubierta por complejos sistemas de surcos, que indican un pasado con varias fases de actividad en su corteza. Algunos de los más grandes cráteres de impacto de su superficie son palimpsestos, formados por el lento flujo del hielo, (como en un glaciar).

Uno de sus rasgos más importantes es una llanura oscura llamada “Galileo regio”, así como una serie de cráteres concéntricos remanentes de un cráter de

impacto antiguo. La sonda Galileo descubrió que Ganímedes tiene su propia magnetosfera, lo que obligó a los científicos a revisar las ideas sobre su estructura, que creía en un núcleo rocoso rodeado de agua con una capa de hielo, mientras que ahora se piensa en un núcleo formado por hierro fundido rodeado de un manto rocoso cubierto por hielo.

El Telescopio Espacial Hubble ha encontrado evidencias de oxígeno en una tenue atmósfera en Ganímedes, muy similar a lo encontrado en Europa.

Ganímedes (Foto: NOAA)

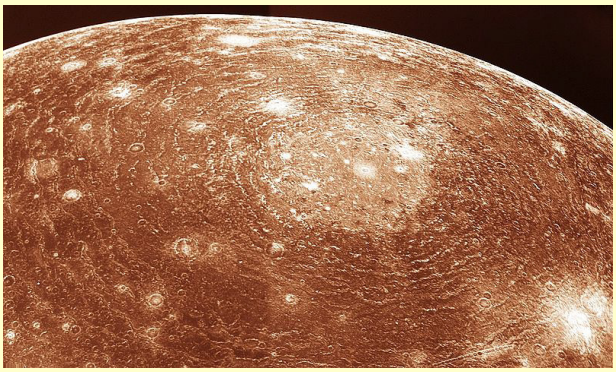
***Calisto***

Tiene 4821 km de diámetro y completa su órbita a 1.882.700 km de Júpiter en unos diecisiete días. Es el satélite más externo de los cuatro galileanos.

Está compuesto, aproximadamente, por un 60% por rocas y hielo, y un 40% por hielo y agua. Posee una superficie helada cubierta uniformemente con cráteres de impacto y pequeñas muestras de la actividad tectónica, igualmente observada en los demás satélites galileanos. Tiene diversas cuencas con varios anillos, siendo la más grande de ellas "Valhalla", de 4000 km de ancho, (la mayor del Sistema Solar).

Posee una atmósfera muy tenue, compuesta principalmente por dióxido de carbono 6 y probablemente oxígeno. Con una atmósfera tan escasa como esta, las moléculas se escaparían en sólo cuatro días, por eso, se supone tiene que haber algún fenómeno que reponga el $CO_2$ que se pierde, hecho que aún no ha sido descubierto.

La sonda Galileo detectó variaciones del campo magnético alrededor del satélite (que no propio) que, según los científicos, pueden haber sido causadas por las corrientes eléctricas que circulaban por un hipotético océano salado debajo de su corteza helada.



Cráter de Valhalla en Calisto. (NASA)

El satélite Calisto, por la sonda Galileo (NASA)

***Satélites interiores y exteriores***

Cabe destacar la existencia de un grupo de satélites interiores: Metis, Adrastea, Amaltea y Tebe, cuyas órbitas son menores que la de Ío. Debido a los constantes impactos de meteoritos que reciben, la gran cantidad de polvo que se desprende pasa a engrosar los anillos de Júpiter (porque Júpiter tiene anillos), lo que podría provocar que los más cercanos, Metis y Adrastea, pudieran llegar a formar una órbita en espiral.

Al pasar la órbita de Calisto encontraremos situaciones curiosas, como la de Leda, Himalia, Lisitea y Elara, que podrían ser fragmentos de un asteroide desintegrado. Tras ellos, existen satélites orbitando en sentido contrario al de los interiores, que podrían ser más bien asteroides atrapados.

***¿Y ahora qué?***

Tras las contribuciones aportadas por las misiones Pioneer 10 (Jupiter Flyby), Voyager y Galileo, se puede decir que disponemos de gran cantidad de información sobre los satélites de Júpiter y del propio planeta, pero todos los datos que se han recogido y las teorías elaboradas, por ejemplo, sobre la existencia de océanos bajo las cortezas de las grandes lunas, han de ser aún corroboradas.

Existe una misión en proceso, cuyo objetivo es el estudio de los mundos habitables alrededor de los gigantes gaseosos. Se trata de la misión JUICE (*JUpiter ICy moons Explorer*), y como no podía ser de otra manera, el objetivo es Júpiter y sus 4 principales lunas. El profesor Abel calle realizó una breve introducción sobre esta misión en el artículo "La exploración del Sistema Solar" del primer número de la Revista de Ciencias, por lo que vamos a adentrarnos más en este tema.

## La misión JUICE

Se trata de una misión de clase L (Large, de mayor tamaño) del programa *Comic Vision 2015-2025* de misiones espaciales de la ESA (Agencia Espacial Europea, http://www.esa.int). Aportará información específica de cada área que dieron a conocer las misiones anteriores. Servirá para aprobar o desechar las teorías sobre las que se ha venido hablando estos últimos años, ya que permitirá abordar los problemas con una capacidad muy superior a estas últimas.

Estructura y objetivos de la misión:

**Temas de interés**

- ¿Cuáles son las condiciones necesarias para la formación de planetas y la aparición de vida?
- ¿Cómo funciona el Sistema Solar?

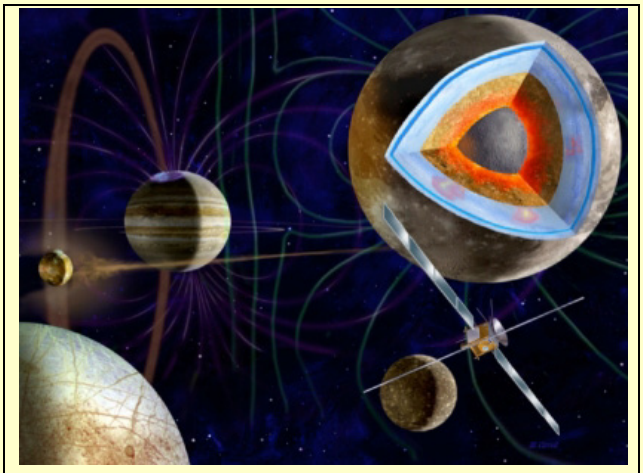
**Objetivos principales de la misión:**

- Explorar la posible aparición de mundos habitables alrededor de los gigantes gaseosos.
- Estudiar el Sistema Joviano como modelo para los gigantes gaseosos (con gran detenimiento en las lunas galileanas).

**Objetivos científicos**

- El entendimiento del Sistema Joviano: Tanto el entendimiento como el conocimiento de su historia, pueden aportar un nuevo punto de vista respecto a cómo han evolucionado estos gigantes gaseosos y sus lunas.
- Los océanos internos: La caracterización de las condiciones que podrían haber llevado a la aparición de entornos habitables en las lunas heladas jovianas, con especial interés en Ganímedes, que presenta un "laboratorio natural" extenso y es la única luna con campo magnético propio.

El estudio de Ganímedes se centrará en la caracterización de las capas oceánicas y reservas de agua en la subsuperficie, la realización de mapas topográficos, geográficos y composicionales sobre la superficie, el estudio de la corteza helada, la caracterización de la distribución de masas interior y de su evolución, la investigación sobre su exosfera y el estudio del campo magnético propio y su interacción con el de Júpiter.



Interpretación artística de la interacción de los campos magnéticos de Júpiter y Ganímedes (ESA)

Respecto a Europa, el objetivo principal está en la búsqueda de la química esencial para la vida, las moléculas orgánicas y el entendimiento de la formación y características de la parte no helada de su corteza. Además, JUICE proporcionará las primeras fotografías de la cara oculta de Europa y la determinación del espesor mínimo de su corteza helada en las regiones más activas.

Júpiter como un modelo para gigantes gaseosos:
Se estudiará la atmósfera de Júpiter, estructura, dinámica y composición, así como la meteorología y química de las nubes de la termosfera. Se podrá calcular la evolución de los sistemas climáticos y mecanismos de transporte de energía, impulso y potencial de las diferentes capas. El estudio de la magnetosfera se afrontará con la investigación de las propiedades tridimensionales del disco magnético y en profundidad de la magnetosfera, ionosfera y

termosfera. Se estudiarán las auroras y emisiones de radio. JUICE también estudiará la interacción de las lunas con la magnetosfera, el acoplamiento gravitacional y la evolución de las mareas a largo plazo.

**Lanzador y maniobras orbitales**

Será lanzada por el cohete Ariane 5 (cohete usado en las misiones de la ESA). Los principales impulsores de la aeronave están pensados para la gran distancia al Sol, para el aprovechamiento de la energía solar y la radiación de Júpiter. Los paneles solares están preparados para bajas intensidades y temperaturas en un ambiente dominado por electrones.

Las inserciones en las órbitas de Júpiter y Ganímedes y el gran número de maniobras de sobrevuelo (más de 25 asistencias y Flybys), requiere que la cantidad de combustible alcance unos 3000 kg.

Lanzador Ariane 5 (ESA)

**Instrumentación**

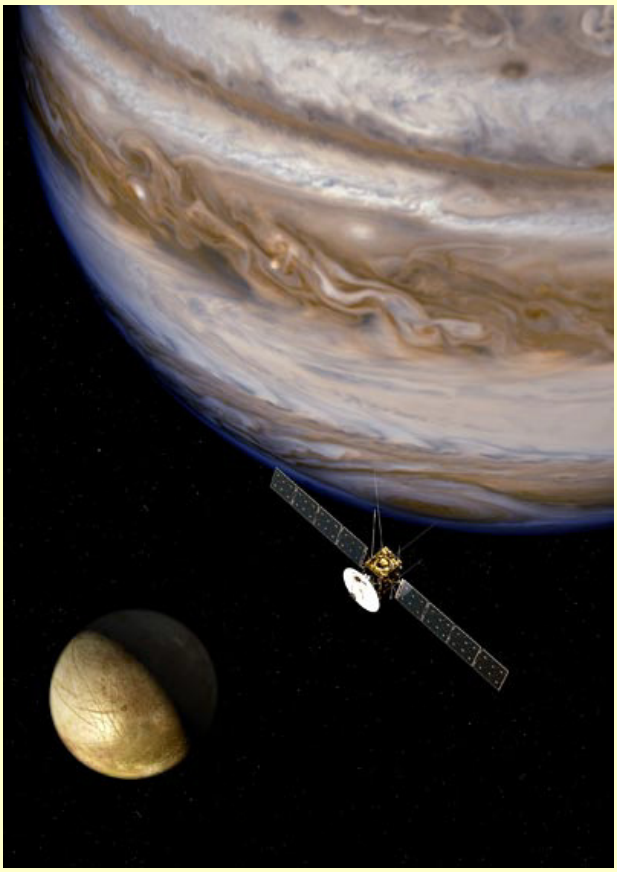
La nave espacial tiene incorporados los instrumentos de teledetección geofísica más potentes jamás lanzados al Sistema Solar exterior: está equipada con diez instrumentos de última generación que le permitirán medir las propiedades de la atmósfera de Júpiter, el campo magnético y el plasma del entorno, así como las propiedades de la corteza y el interior de las tres lunas heladas, Ganímedes, Europa y Calisto.

**Escenario y operaciones**

La nave será lanzada en junio de 2022 por el cohete Ariane 5, que usará la asistencia gravitatoria de Venus y la Tierra para alcanzar el objetivo tras de 7,6 años de viaje. Después de la inserción en la órbita de Júpiter en enero de 2030, realizará un viaje por el Sistema Joviano centrándose preferentemente en las observaciones.

Durante este viaje, la gravedad de Calisto y Ganímedes asistirá a la nave, así como los dos Flybys que hay programados para Europa. Posteriormente, se empleará la asistencia de Calisto para alcanzar una inclinación de casi 30º y habilitar la observación de las regiones polares de Júpiter.

La misión culminará con su dedicación al estudio de Ganímedes durante 8 meses.



Representación artística de la misión Juice explorando el sistema joviano (Foto: ESA)

# Curiosidades atmosféricas de Saturno

**Víctor Manuel González**
Grupo Universitario de Astronomía

Desde que la sonda Cassini comenzara su andadura por el sistema de Saturno, no ha dejado de resolver enigmas y plantear otros. Sin duda, el hexágono del polo norte y las monstruosas tormentas en su atmósfera están acaparando la atención de los astrónomos dedicados al estudio de las atmósferas planetarias.

La atmósfera de Saturno, a pesar del casi homogéneo aspecto que presenta en comparación con la de su vecino Júpiter, esconde algunos de los fenómenos atmosféricos más fascinantes del Sistema Solar. Presenta bandas y corrientes en chorro, como la mayoría de las atmósferas planetarias, pero sin ir más lejos, en su polo norte podemos observar un gigantesco hexágono con lados de 13.700 km de longitud, 1000km más que el diámetro de la tierra.

Este gigantesco sistema nuboso, conocido desde que las sondas Voyager lo descubrieron en los años 80 y recientemente fotografiado por la Cassini, gira constantemente alrededor del planeta a 79º de latitud, impulsado por la potente corriente en chorro presente en esas regiones y que constituye el vórtice polar. Esto no es una particularidad de Saturno, por lo general muchas atmósferas planetarias presentan un vórtice polar definido, tal es el caso de la Tierra, ya que en los polos existe una evidente y continua rotación de las masas de aire, solo deformada por los efectos de la desigualdad de la superficie de nuestro planeta. Pero, ¿por qué en Saturno es tan estable y además tiene forma de hexágono?

La forma hexagonal es realmente una onda estacionaria provocada por la interacción del movimiento de la corriente en chorro con la rotación del planeta, y su persistencia se debe a la ausencia de una superficie desigual que altere los desequilibrios naturales que lo mantienen. En la Tierra, la combinación de continentes y océanos así como la orografía terrestre, generan intensas variaciones y ondulaciones en la circulación general atmosférica que permiten que los grandes sistemas meteorológicos se estén renovando continuamente, no obstante, a pesar de la escasa estabilidad atmosférica de nuestro planeta, se han observado estructuras poligonales naturales (fundamentalmente pentágonos y hexágonos) en lugares muy singulares, como en el ojo de algunos de los ciclones tropicales más intensos, cuya estructura nubosa es lo suficientemente estable como para que la simetría del vórtice sea casi completa y las convergencias de vientos en el centro mantengan una estructura poligonal estacionaria durante bastantes horas.

Sin abandonar el polo norte de Saturno, podemos hacer mención a un reciente descubrimiento. El 27 de noviembre del pasado 2012, la Cassini tomó imágenes de un sistema ciclónico de aspecto similar a un huracán terrestre, bastante simétrico y de unos 2000 km de diámetro, realmente pequeño en comparación con el tamaño del planeta, pero con velocidades de rotación ligeramente superiores a los 500 km/h, como en los tornados terrestres más violentos, pero con un diámetro 1000 veces superior. A latitudes tan altas, en la Tierra, los gradientes de temperatura y presión son tan fuertes que impiden la formación de borrascas con una simetría evidente. Para encontrar borrascas con estructura simétrica (como los huracanes) tenemos que desplazarnos a los trópicos, donde la atmósfera presenta menos contrastes entre masas de aire. Sin embargo en Saturno, la homogeneidad de los gradientes termodinámicos horizontales y la gran velocidad de rotación del planeta, probablemente, sean los responsables de permitir sistemas meteorológicos simétricos prácticamente en cualquier región de su superficie.

*Revista de Ciencias*, 2, 41-42, junio 2013
ISSN: 2255-5943

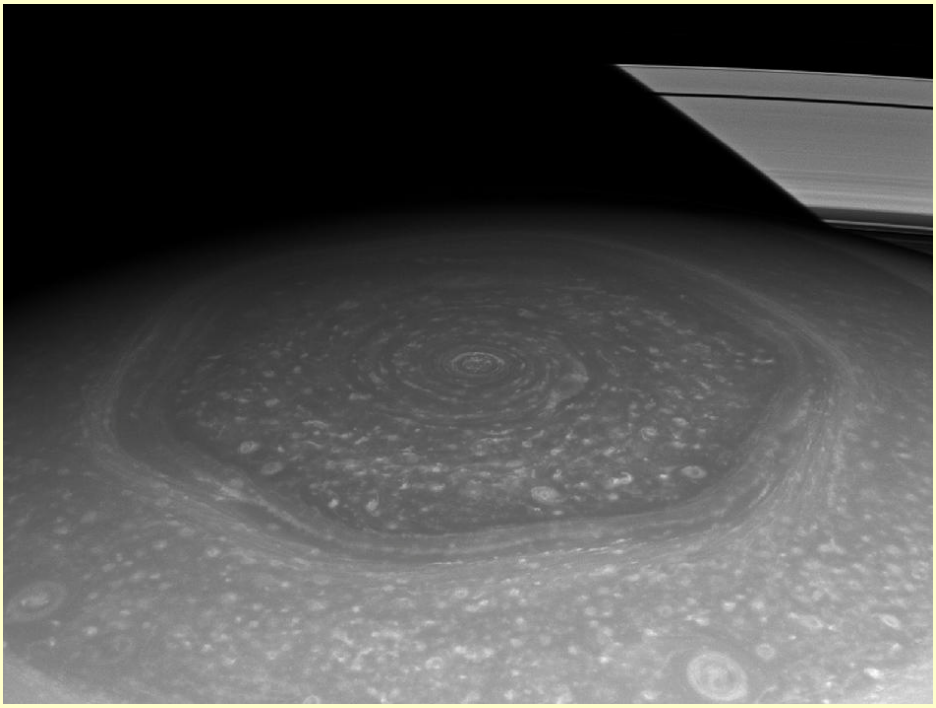


Figura 1: Hexágono polar de Saturno
Fuente: http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2456.html

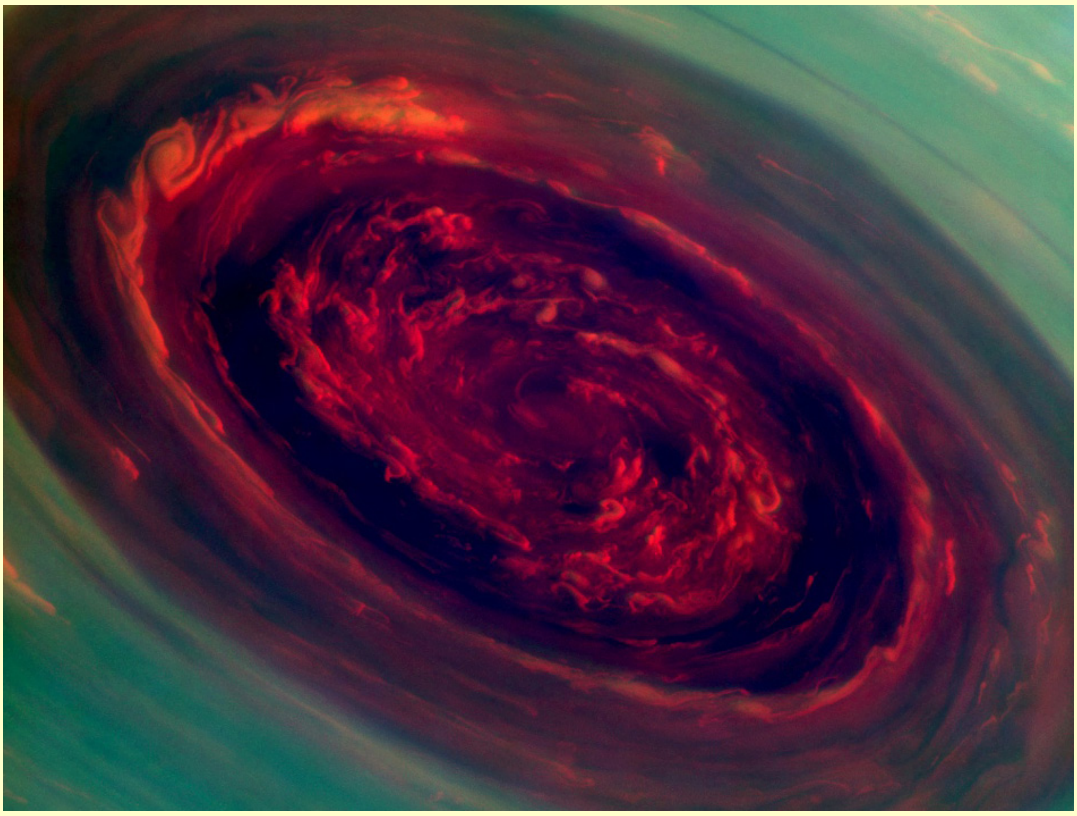


Figura 2: Vórtice ciclónico en el polo norte de Saturno
Fuente: http://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia14944.html

# Cosmonoticias: pequeño saltamontes

**Juan Carbajo**
Grupo Universitario de Astronomía

Parece bastante claro que el futuro de la astronáutica, en lo que respecta al abastecimiento de la ya concluida Estación Espacial Internacional (ISS), pasa por la contratación y gestión comercial de servicios. Tras los intentos rusos de involucrar el turismo en los viajes espaciales para lograr financiación, parece que la empresa SpaceX es la que lidera el campo del transporte.

La empresa SpaceX es una de las responsables del abastecimiento de la Estación Espacial Internacional. Esta tarea la realiza mediante la cápsula *Dragon* y el lanzador de dos etapas *Falcon 9*, sin embargo pretende ir mucho más allá.

Uno de sus proyectos más interesantes es hacer que su lanzador sea totalmente reutilizable. Esta no es una idea en absoluto nueva; ha habido numerosos proyectos con este objetivo y, en algún caso, el transbordador espacial de Estados Unidos, se logro reutilizar parte del sistema. Sin embargo estos sistemas resultaron no ser tan rentables como se preveía. Entonces ¿que pretende hacer SpaceX?

La intención de la empresa es que una vez terminada la tarea de la fase, ésta decelere, regrese a tierra y aterrice en vertical en un lugar concreto: la primera etapa entraría en la atmósfera a baja velocidad, por lo que no sufriría daños durante la reentrada y aterrizaría empleando el empuje de 3 de sus 9 motores. La segunda fase realizaría su reentrada a más velocidad, para lo cual necesitaría un escudo térmico propio.

Este sistema pretende abaratar los costes del vuelo espacial, pero tiene varios inconvenientes; los dos principales son:

1) Se añade peso al cohete al añadir, a cada fase, su sistema de aterrizaje y al tener que transportar el combustible necesario para decelerar y aterrizar.

2) La reutilización rentable de la segunda fase es más compleja al tener que emplear un escudo térmico propio que habría que cambiar en cada vuelo. Además, esta fase sufriría un mayor deterioro.

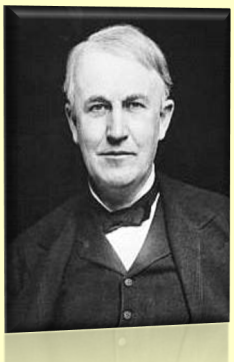
Las primeras pruebas se están realizando mediante el sistema Grasshopper, vehículo VTVL (*Vertical Take-off and Vertical Landing*) que debe probar las tecnologías necesarias para permitir la reutilización. Este prototipo está realizando avances importantes, consiguiendo hasta ahora "saltar" hasta los 80 m y aterrizar con gran precisión.

La idea es sin duda apasionante, habrá que ver si al final resulta rentable.

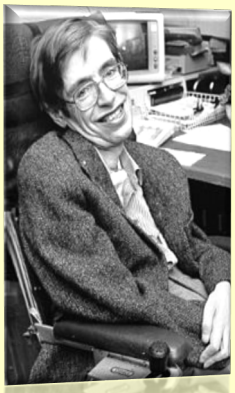
*SpaceX Grasshopper* durante uno de sus "saltos" el 17 de Diciembre de 2012. Fuente: http://www.spacex.com/

*Revista de Ciencias*, 2, 43, junio 2013
ISSN: 2255-5943

*La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos.*
Albert Einstein (1879-1955)



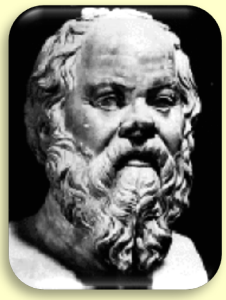
*El genio es un uno por ciento de inspiración, y un noventa y nueve por ciento de transpiración.*
Thomas Alva Edison(1847-1931)



*Dios no sólo juega a los dados: a veces los tira donde no se pueden ver.*
Stephen Hawking (1942-)

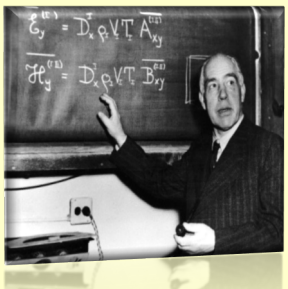
*He redactado esta carta más extensa de lo usual porque carezco de tiempo para escribirla más breve.*
Blaise Pascal (1623-1661)

*A veces creo que estamos solos en el universo, y a veces creo que no. En ambos casos, la idea es turbadora.*
Arthur C. Clark (1917-2008)



*La ciencia humana consiste más en destruir errores que en descubrir verdades.*
Sócrates (470 a.C. -399 a.C.)

*Siempre que enseñes, enseña a la vez a dudar de lo que enseñas.*
José Ortega y Gasset (1883-1955)



*Un experto es una persona que ha cometido todos los errores que se pueden cometer en un determinado campo.*
Niels Bohr (1885-1962)

# Revista de Ciencias

Universidad de Valladolid

Revista de Ciencias
Número 2
Junio 2013

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