

ARTE Y CIENCIA: LA ESTÉTICA DEL CONOCIMIENTO

Redacción

DIRECCIÓN:

- Ana Isabel Elduque Palomo

SUBDIRECCIÓN:

- Concepción Aldea Chagoyen

DISEÑO GRÁFICO Y MAQUETACIÓN:

- Víctor Sola Martínez

COMISIÓN DE PUBLICACIÓN:

- Jesús Anzano Lacarte
- Enrique Manuel Artal Bartolo
- Blanca Bauluz Lázaro
- Julio Bernués Pardo
- José Ignacio Canudo Sanagustín
- Ángel Francés Román
- M^a José Gimeno Serrano
- María Luisa Sarsa Sarsa
- María Antonia Zapata Abad

Edita

Facultad de Ciencias,
Universidad de Zaragoza.
Plaza San Francisco, s/n
50009 Zaragoza

e-mail: web.ciencias@unizar.es

IMPRESIÓN: Gráficas LEMA, Zaragoza.

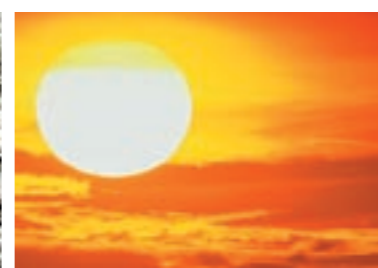
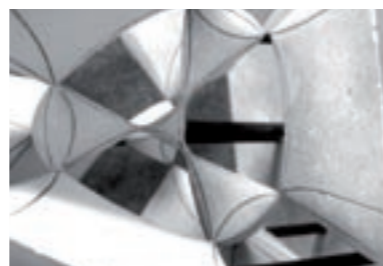
DEPÓSITO LEGAL: Z-1942-08

ISSN: 1888-7848 (Ed. impresa)
ISSN: 1989-0559 (Ed. digital)

Imágenes: fuentes citadas en pie de foto.

Portada: *uomo vitruviano* por Leonardo da Vinci (it.wikipedia.org), cartel de Botánica de la colección de la Facultad de Ciencias e imagen de la exposición IMAGINARY.

La revista no comparte necesariamente las opiniones de los artículos firmados y entrevistas.



<u>Editorial</u>	4
<u>El cambio climático</u> Amadeo Uriel	6
<u>Metales en Medicina</u> Antonio Laguna y M ^a Concepción Gimeno	16
<u>Ibones del Pirineo aragonés: lagos glaciares entre agrestes montañas</u> Javier del Valle, Tomás Arruebo, Alfonso Pardo, José Matesanz, Carlos Rodríguez, Zoé Santolaria, Javier Lanaja y José Urieta	32
<u>Leer el periódico con ojos matemáticos</u> Raúl Ibáñez	48
<u>AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos</u> Manuel Aguilar	58
<u>Arte y Ciencia: la invención de la litografía</u> Silvia Pagliano	76
<u>El legado del Año Internacional de la Química</u> Ana Isabel Elduque	92
<u>Los microRNA: pequeñas moléculas, grandes reguladoras</u> M ^a Antonia Lizarbe	98
<u>IMAGINARY, una mirada matemática</u> Enrique Artal, Julio Bernués y María Teresa Lozano Imízcoz	110
<u>El túnel subterráneo de Canfranc: 25 años apasionantes</u> José Ángel Villar	116
<u>Noticias y actividades</u>	126

Arte y Ciencia, la estética del conocimiento

Es posible que alguno de los lectores de conCIENCIAS se pregunte qué contenidos ofrecerá este número para que nos hayamos atrevido a titularlo así. La respuesta obvia sería el animarles a la lectura, tranquila y pausada, de nuestra revista. Pero no estaríamos cumpliendo con el espíritu de la revista si no explicáramos lo que nos anima a hacerlo.

En los números anteriores siempre hemos querido incluir algunos artículos cuya temática gravitara alrededor de una cuestión común. Nuestra revista quiere ser, por encima de cualquier otra pretensión, divulgativa. Pensamos que este esfuerzo difusor debe reflejar la complejidad de la Ciencia y del conocimiento. Siempre hemos pretendido mostrar que la investigación científica tiene muchas y muy variadas facetas. Pensamos que ya ha llegado el tiempo de decir que la Ciencia también puede colaborar con el mundo de la belleza.

No es fácil que teorías complejas puedan mostrar su lado estético. Complejas ecuaciones, conceptos intrincados y múltiples relaciones son muy frecuentes en las teorías actuales. Pero cuando se consigue transformar todo ese entramado matemático en formas y colores, cuando las reacciones químicas ayudan a crear bellas imágenes y cuando la observación de las maravillas de la Naturaleza nos aporta una profunda paz interior, la Ciencia demuestra una vez más que es humana, profundamente humana.

Queremos que nuestros lectores reflexionen sobre estas cuestiones. Incluso algunos de ellos habrán podido comprobar por ellos mismos que lo aquí dicho no exagera un ápice con la realidad. La exposición *Imaginary*, que se pudo visitar hace algunas semanas, así lo corrobora. La Ciencia, el saber y el conocimiento deben, para ser útiles al hombre, entroncar con sus más profundas raíces y sentimientos. Si el afán por saber es consustancial con el ser humano, la búsqueda de la belleza, el sentimiento estético de la vida, no lo es menos.

En estos tiempos de las llamadas *Tecnologías de la Información* hemos querido rescatar una parte de nuestro pasado. Un pasado que unía Ciencia y Arte. Desde la Facultad se está organizando una muestra que, creo, tendrá un carácter excepcional. Hace cien años las técnicas de publicación y de impresión no disponían de la tecnología actual. La enseñanza disponía de muchos menos recursos que en la actualidad. Pero ello se suplía con imaginación y, algunas veces, con la realización de auténticas obras de arte. La belleza intrínseca del material didáctico era un importante aliado a la hora de fomentar el estudio de la Ciencia.

En este número de conCIENCIAS ofrecemos un avance sobre lo que será una exposición de láminas de temática relacionada con la Biología que tendrá lugar en los próximos meses. El valor artístico del material gráfico sorprenderá a propios y a extraños. Su valor actual reside en esto mismo. El atractivo de los carteles, cien años después de su impresión, reside en su gran belleza y expresividad. Su contemplación, hoy en pleno siglo XXI, conmueve más por su valor estético que didáctico. Espero que dentro de poco tiempo puedan disfrutar de ellos.

Dentro de nuestro espíritu ecléctico, la revista se completa con artículos de variado contenido. Pero, como es habitual, destinados a la divulgación del quehacer científico cotidiano. El cambio climático y sus evidencias meteorológicas, la relación cada día más notoria entre Medicina, Química y Biología Molecular, la lectura analítica y crítica de la prensa, los nuevos equipos de investigación espacial nos enseñan nuevos campos de investigación que, sin duda alguna, permitirán a nuestro lector observar el mundo que nos rodea con una mirada más amplia y sabia.

“Si el afán por saber es consustancial con el ser humano, la búsqueda de la belleza, el sentimiento estético de la vida, no lo es menos.”

Desde la Dirección de conCIENCIAS esperamos que disfruten de este nuevo número. La Ciencia no tiene límites en su desarrollo y el mundo de la estética y del arte no debe ser un estímulo ajeno a nuestra actividad.

Ana Isabel Elduque Palomo
Directora de conCIENCIAS



EL CAMBIO CLIMÁTICO

POR AMADEO URIEL



El cambio climático es un fenómeno del que se habla con frecuencia y en torno al cual, a veces, se suscitan controversias, que casi siempre obedecen a intereses o modelos sociales enfrentados. A lo largo de este breve artículo me gustaría aclarar algunas de las dudas más frecuentes y dejar claros tres aspectos muy importantes:

- El cambio climático es un hecho real, del cual tenemos evidencias.
- Existen grandes incertidumbres cuando se hacen proyecciones de futuro.
- No todos los fenómenos meteorológicos o climáticos, que se dan con frecuencia y que se salen de lo "normal", son achacables al cambio climático.

TIEMPO, CLIMA, VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Por "tiempo" entendemos las condiciones atmosféricas que se están produciendo en un momento y lugar dados (esta tarde en Zaragoza el tiempo era lluvioso, soleado,...). El término "clima" se refiere a las condiciones medias de los distintos parámetros meteorológicos, en un punto o zona terrestre, a lo largo de un período de tiempo más o menos largo (las series climáticas suelen normalizarse tomando períodos de 30 años) y como consecuencia podremos afirmar que, en una determinada ciudad (o región), el clima es marítimo templado, mientras que en otra puede ser continental extremo.

El clima de una zona no es algo que permanece inalterado a lo largo del tiempo, sino que presenta una gran variabilidad natural (fenómenos puntuales en el tiempo) y, también, unas tendencias (que para ser observadas requiere hacer un seguimiento de las series climáticas y, cuanto más largo, mejor). Por tanto, el que un

año sea anormalmente cálido, o una primavera muy seca, no puede ser atribuido de inmediato al fenómeno del cambio climático, ya que estas anomalías pueden ser debidas a la citada variabilidad natural y no se deben confundir con las tendencias.

Por ejemplo, en la figura está representada la evolución de las temperaturas medias anuales en la ciudad de Zaragoza (desde 1869 hasta el 2010). Podemos observar la variabilidad del clima con años muy fríos, como 1909, o muy cálidos, como el 2006 y el 2009, y, calculando la media móvil a cinco años (línea roja gruesa), podemos apreciar una clara tendencia al calentamiento desde mitad de la década de los años setenta del siglo pasado hasta la actualidad.

En cambio, si consideramos las precipitaciones anuales de la ciudad de Zaragoza desde 1858 hasta la actualidad (ver figura), podemos encontrarnos con años muy secos y otros muy lluviosos, moviéndonos entre los mínimos de 1894 y 1912 y el máximo de 1959. En este caso, podemos apreciar la gran variabilidad natural, intuir la presencia de ciclos de 8 a 12 años y de otras duraciones incluso, pero lo que no vemos es una tendencia clara que podamos relacionar con el cambio climático.

Tal como veremos más adelante, existen causas naturales que explican estos cambios y tendencias, pero el término "cambio climático" se reserva para aquellas variaciones que solo son explicables como consecuencia de las actividades humanas (origen antropogénico).

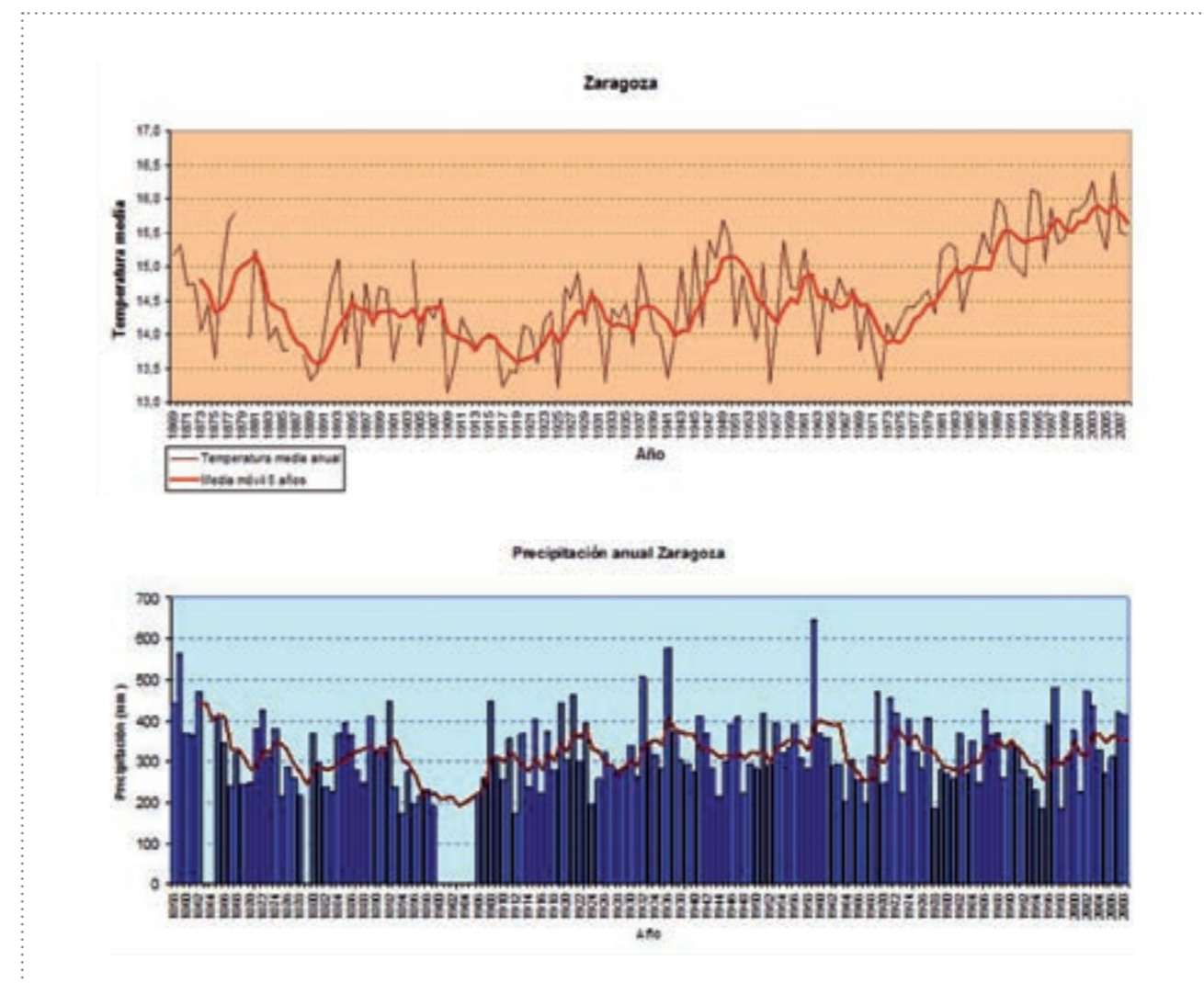
BALANCE RADIATIVO Y EFECTO INVERNADERO

El efecto invernadero es necesario para que en nuestro planeta se den las condiciones ambientales que conocemos actualmente. El sol se comporta como un cuerpo negro cuya tem-

peratura superficial fuera de 6000 K. De acuerdo con la Ley de Planck, el máximo de energía lo emite en forma de radiación de onda corta. Al llegar a la atmósfera, parte de esta radiación es reflejada, absorbida o dispersada, pero la mayor proporción alcanza el suelo (la atmósfera es casi transparente a la radiación de onda corta). Al alcanzar el suelo, nuevamente parte de la radiación incidente será reflejada, pero el resto se absorbe y calienta la Tierra, alcanzado una temperatura media de unos 300 K. Ahora la Tierra, como cuerpo negro, emiti-

rá el máximo de energía hacia el espacio en forma de radiación de onda larga, la cual es ampliamente absorbida por los denominados gases de efecto invernadero, calentándose la atmósfera, principalmente, en sus capas bajas (la atmósfera es bastante opaca a la radiación de onda larga).

La mayor parte de estos gases de efecto invernadero son componentes naturales de la atmósfera y juegan un papel muy importante en el balance radiativo atmosférico, a pesar



Serie histórica de temperaturas medias anuales (°C) de la ciudad de Zaragoza entre 1869 y 2010 (arriba). Serie histórica de precipitaciones anuales (mm) de la ciudad de Zaragoza entre 1858 y 2010 (abajo).

*AEMET

de que sus concentraciones son muy bajas. En la tabla se indica concentraciones, grado de contribución al forzamiento radiativo y foco antropogénico.

Es típico de los escépticos efectuar tres tipos de comentarios acerca de esto:

- “Los gases de efecto invernadero son un componente natural de nuestra atmósfera”. Ciertamente, salvo en el último caso de la tabla, pero solamente son “buenos” cuando están presentes en concentraciones bajísimas. El problema es que con las actividades humanas está aumentando apreciablemente su concentración.
- “En otros momentos de la historia de nuestro planeta, algunos existían en concentra-

ciones más altas”. Ciertamente, pero entonces no había seres humanos sobre la Tierra y no hubieran podido sobrevivir en aquellas condiciones.

- “En otros momentos de la historia de la humanidad se produjeron variaciones notables en las concentraciones de CO_2 ”. Ciertamente, pero el problema es que no tuvieron lugar con la rapidez e intensidad con que se están produciendo ahora.

FORZAMIENTO NATURAL Y ANTROPOGÉNICO DEL BALANCE RADIATIVO

Existen varios factores naturales que explican el origen y variaciones del clima de la Tierra a lo largo del tiempo:

GAS	CONCENTRACIÓN %	CONTRIBUCIÓN AL FORZAMIENTO RADIATIVO	ORIGEN
CO_2	0,036	60	Combustiones y respiración de los seres vivos. Tiene como sumideros los océanos y la fotosíntesis.
CH_4	0,0002	15	Se libera en los océanos y grandes superficies de agua, incendios, actividades agrarias y ganaderas y vertederos.
N_2O	0,00003	5	Emitido por los suelos, océanos y volcanes, quema de combustibles fósiles y aplicación de fertilizantes.
O_3 HFCs PFCs SF_3	0,000005	20	De origen totalmente artificial (salvo el ozono), proceden de los sistemas de refrigeración, propelentes de aerosoles, producción de aluminio y aislantes eléctricos.

Gases de efecto invernadero en la atmósfera.

- La deriva continental y el movimiento de las placas tectónicas.
- La distribución de las corrientes marinas, que son un formidable mecanismo de transporte de calor a nivel planetario.
- Los movimientos tectónicos, que dan lugar a que algunas zonas de la corteza terrestre se hundan o se eleven y que, actualmente, están dando lugar al aumento de extensión de algunos desiertos asiáticos.
- La atmósfera es una máquina que funciona alimentada por la energía solar, las variaciones en la actividad solar tienen una repercusión casi inmediata sobre el clima.
- La variación de los parámetros orbitales de nuestro planeta (elongación, precesión, nutación), dan lugar a los ciclos de glaciaciones y períodos interglaciares.
- El estado de la superficie terrestre (extensión de hielos, zonas cubiertas de vegetación, etc). Esto repercute sobre el albedo (fracción de energía incidente que la Tierra refleja al espacio) y por tanto sobre el balance radiativo.
- Las grandes erupciones volcánicas e incendios forestales inyectan en la atmósfera toneladas de partículas sólidas (aerosoles) que modifican el citado balance radiativo.

Por otro lado, y como ya hemos apuntado en parte anteriormente, el hombre, con sus actividades, contribuye a modificar el balance (forzamiento antropogénico) de las siguientes maneras:

- Emitiendo gases y partículas sólidas a la atmósfera, como consecuencia de la quema de combustibles fósiles, actividades industriales, agrícolas y ganaderas.

El cambio climático

- Modificando el uso de suelos y variando, por tanto, el albedo superficial.
- Afectando a los posibles sumideros de gases de efecto invernadero (tala de árboles, contaminación del mar...).

¿PUEDE LA HUMANIDAD SOBREVIVIR A LAS CRISIS CLIMÁTICAS?

El que el clima sea “bueno” o “malo” es algo muy subjetivo y depende de para qué y para quién. En el pasado, nuestro planeta soportaba condiciones mucho más extremas de temperatura, concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, etc. y, sin embargo, como afirman los escépticos, existía la “vida”. El problema es que esas condiciones no eran apropiadas para albergar una “forma de vida” como nosotros.

Por otro lado, debemos tener en cuenta tanto nuestra **capacidad de adaptación** a condiciones extremas, que tiene unos límites que no se pueden sobrepasar, como el **tiempo de adaptación** requerido (cuanto más rápido sea el cambio peor lo tendremos), ya que, si bien la especie podría sobrevivir como tal, tal vez estuviera amenazado nuestro estilo de vida actual o la civilización, tal como hoy la concebimos.

Históricamente, la humanidad ha dejado patente su incapacidad para afrontar las grandes crisis climáticas, que en ocasiones supusieron la pérdida de millones de vidas humanas o la vuelta atrás en cientos o miles de años de desarrollo en las condiciones de vida, la cultura, el arte y la tecnología humanas. Por ejemplo, durante el período cálido/seco medieval (la temperatura media fue entre 1°C o 1.5°C superior a la actual, en la mayor parte del hemisferio norte), entre el año 1000 y 1200 de nuestra era, las sequías (unidas en la mayoría de los casos a un crecimiento descontrolado previo de la población) duraron no años,

como ahora, sino décadas que, en ocasiones, alcanzaron el medio siglo, lo cual llevó a que varias civilizaciones enteras colapsaran o decayeran: los mayas en el sur de Méjico y Guatemala, los señoríos de Chimor y otros pueblos Incas en Perú, los jemeres en Camboya,...y a que proliferaran las hambrunas en la India, China y nordeste de África.

¿EL CAMBIO CLIMÁTICO ES CONSTATABLE? ¿ES IGUAL EN TODAS LAS ZONAS DEL PLANETA?

Se ha podido constatar una clara tendencia, a nivel global, tanto en el aumento de las temperaturas medias, como del nivel del mar, así como una disminución en la extensión de las zonas cubiertas por nieves perpetuas. A esto se podrían añadir más indicadores físicos (variaciones en la escorrentía de ríos, extensiones de lagos, etc) o biológicos (migración de especies de aguas y zonas cálidas hacia latitudes cada vez más altas, alteraciones en los pisos de vegetación en las zonas de montaña, etc...).

Una de las pruebas que más me gusta, acerca de la bondad de los modelos climáticos con que contamos y del forzamiento antropogénico, es la siguiente:

Si nos fijamos en las gráficas de cualquiera de los cuadros de la figura, vemos una línea negra que corresponde a la evolución real de las temperaturas medias anuales medidas. La banda azul es la proyección realizada por los modelos climáticos, teniendo en cuenta únicamente los forzamientos naturales (variación de parámetros orbitales, actividad solar y grandes erupciones volcánicas), representa bien la evolución del clima en tiempos pasados pero no así

“La atmósfera es una máquina que funciona alimentada por la energía solar.”

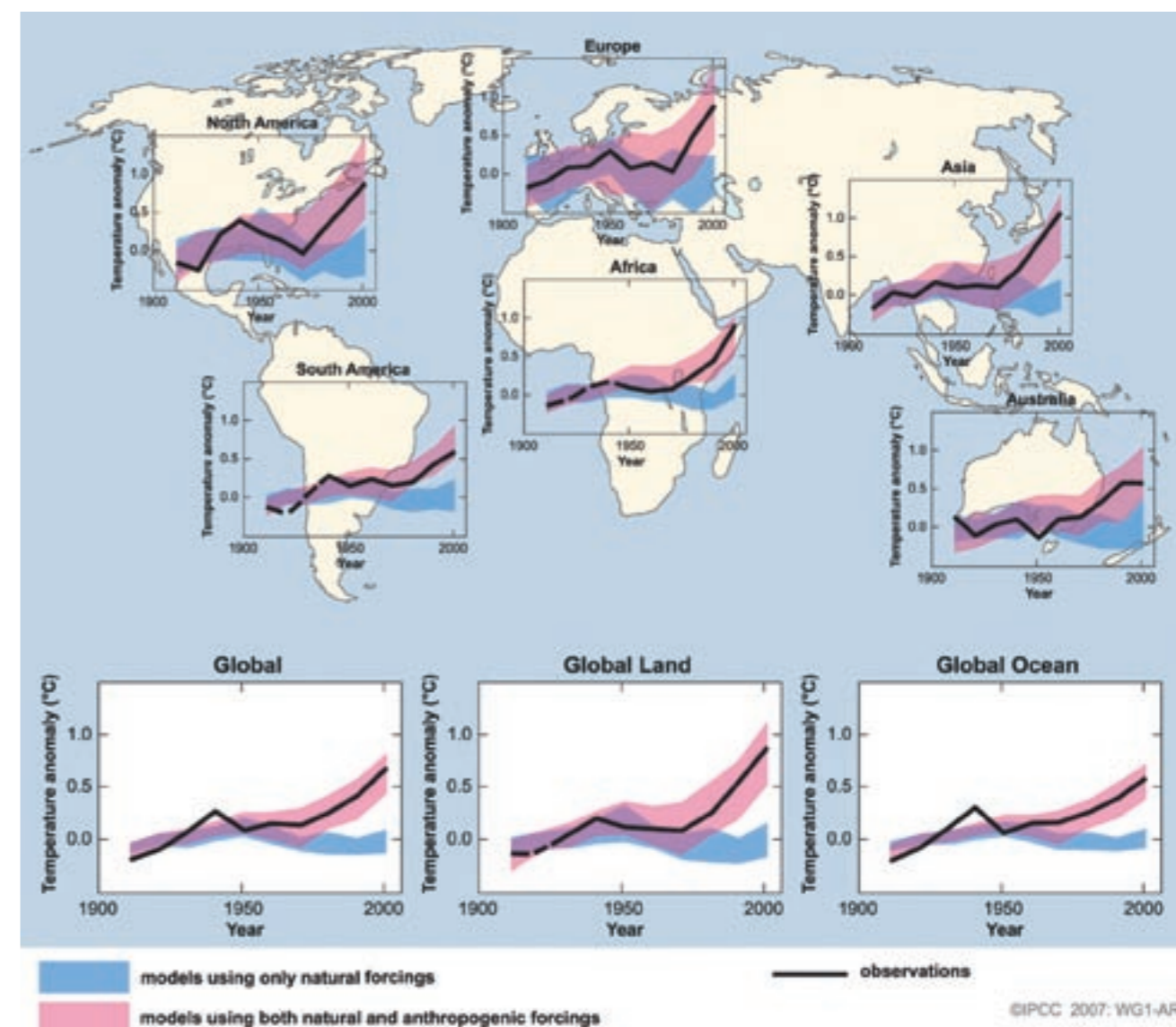
durante las últimas décadas. La banda rosa representa la evolución climática prevista por los modelos cuando, además del forzamiento natural, introducimos el antropogénico (emisiones de gases de efecto invernadero básicamente). Queda patente que las tendencias observadas se explican mejor en el segundo caso.

Por otro lado, podemos comprobar que las tendencias no son iguales a nivel global, si consideramos las zonas oceánicas o tierra adentro. Continente por continente o localidad por

localidad (si lo hiciéramos con más detalle), comprobamos que las tendencias dependen mucho del grado de continentalidad y de la altitud. Así, en las zonas marítimas la pendiente de la tendencia de la temperatura es menor.

¿HACIA DÓNDE VAMOS?

El futuro del clima de nuestro planeta dependerá, en gran medida, de lo que los gobiernos y ciudadanos pensemos hacer. Los científicos, a la hora de hacer las proyecciones climáticas,



Cambio experimentado por la temperatura a nivel mundial y continental. Informe del IPCC 2007. OMM.

El cambio climático

trabajan actualmente con varios modelos simultáneamente (proyecciones multimodelo) y sobre diversos escenarios de emisiones (B1, A1T, B2, A1B, A2, A1FI). Estos escenarios se configuran considerando diversos factores:

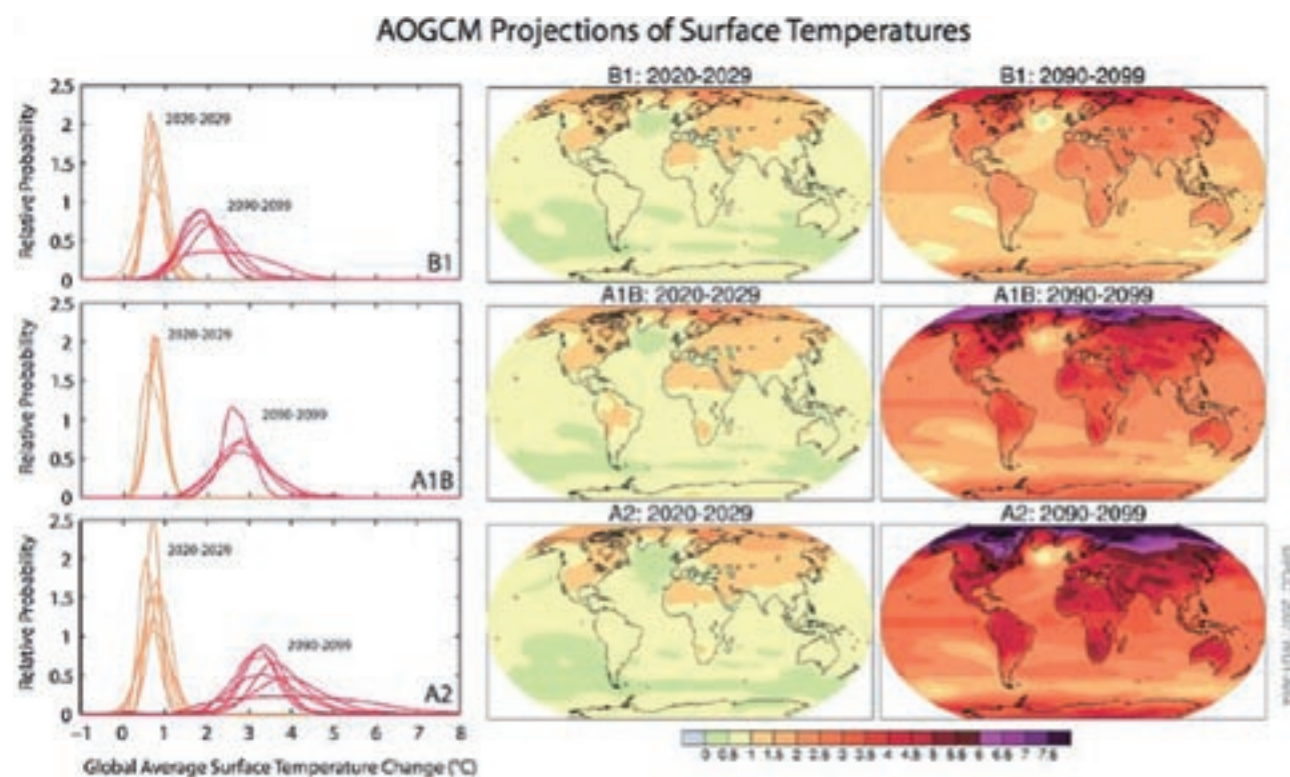
- Crecimiento ilimitado de la población, mantenimiento en un nivel dado o reducción.
- Modelo energético basado en consumo de combustibles fósiles, energías alternativas o mixto.

- Evolución mundial hacia la búsqueda de soluciones locales o globales.
- Modelos de desarrollos tecnológicos e industriales.

En el caso de la evolución prevista de las temperaturas, si bien hay diferencias según el modelo climático y escenario que consideremos, hay una tendencia clara al aumento de las mismas, tanto mayor cuanto menos respetuoso con el medio ambiente sea el escenario considerado.

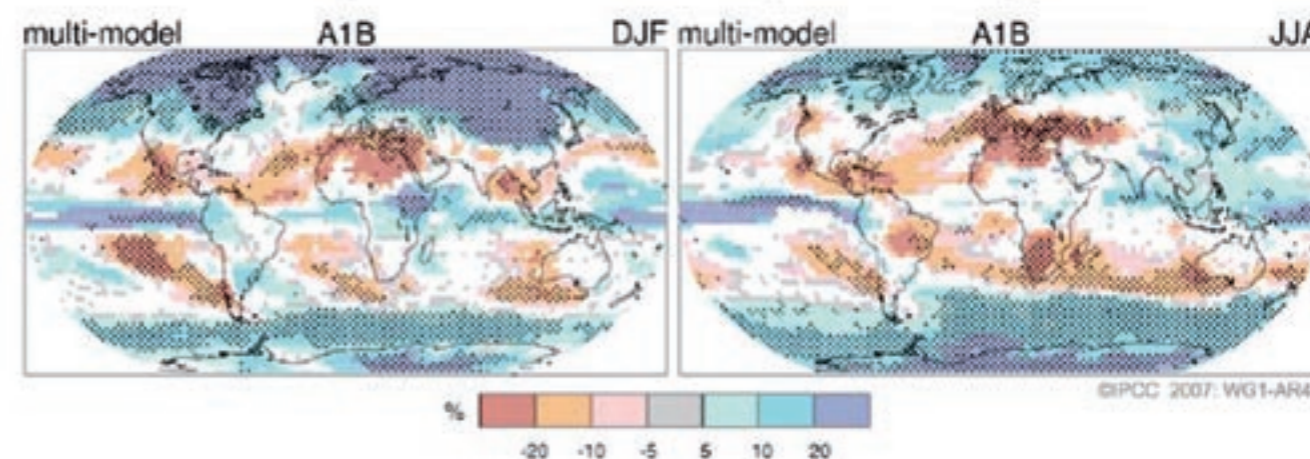
“En el caso de la evolución prevista de las temperaturas, hay una tendencia clara al aumento de las mismas, tanto mayor cuanto menos respetuoso con el medio ambiente sea el escenario considerado.”

En la figura tenemos, para tres escenarios (el B1 es el más “ecológico”), las proyecciones de temperatura previstas para el comienzo y final del siglo presente, promediadas para varios modelos y tomando como referencia el período 1980-1999.



Proyecciones del calentamiento superficial, según diversos escenarios, obtenidas de un modelo de circulación general atmósfera-océano. Informe del IPCC 2007. OMM.

Projected Patterns of Precipitation Changes



Proyecciones multimodelo de las pautas de cambio de las precipitaciones. Informe del IPCC 2007. OMM.

En el caso de las precipitaciones, el desacuerdo entre los modelos es mayor y, además, depende de las zonas del planeta a considerar. Así, en la figura tenemos los cambios esperados a finales de este siglo, expresados en tanto por ciento, respecto al período 1980-1999, utilizando varios modelos y basadas en un escenario de tipo intermedio A1B, para los períodos diciembre-febrero (izquierda) y junio-agosto (derecha). Las zonas punteadas representan las áreas donde más de un 90% de los modelos concuerdan con el signo del cambio y las que están en blanco donde más de un 66% de los modelos coinciden. Llama la atención, en el caso del área mediterránea de la Península que, tanto en invierno como en verano, se augura un descenso en las pautas de precipitaciones, más certero y acusado en la época estival.

Amadeo Uriel (en colaboración con Juan Carlos Tudela)

Agencia Estatal de Meteorología de Aragón

BIBLIOGRAFÍA

- Informe del IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) del 2007. OMM (Organización Meteorológica Mundial).
- El gran calentamiento. Brian Fagan. Editorial Gedisa, 2009.
- Climate Change: The Point of No Return. Mojib Latif. The sustainability Project, Haus Publishing., London, 2009.
- -olefín n° 33 (julio de 2011) de la AME (Asociación Meteorológica Española). Ernesto Rodríguez Camino y Francisco Pérez Puebla.



METALES EN MEDICINA

“La Química Inorgánica biomédica es un área muy importante dentro de la Medicina actual. Ofrece un amplio abanico de posibilidades en el diseño de nuevos fármacos para su uso, tanto en diagnóstico como en terapia, y poder así encontrar nuevos tratamientos de enfermedades que todavía hoy son intratables.”

**POR ANTONIO LAGUNA
Y M^a CONCEPCIÓN GIMENO**

La aplicación de la Química en la Medicina ha sido un campo tradicionalmente dominado por la Química Orgánica, en el que la mayoría de los compuestos utilizados como fármacos pueden denominarse orgánicos. Sin embargo, la Química Inorgánica biomédica es un área muy importante dentro de la Medicina actual. Ofrece un amplio abanico de posibilidades a la hora de diseñar nuevos fármacos para su uso, tanto en diagnóstico como en terapia, y poder así encontrar nuevos tratamientos para enfermedades que todavía hoy son intratables. Los metales han sido utilizados por el hombre en medicina desde la antigüedad. Basta mencionar el uso del oro (Au) en China 2500 años antes de Cristo, el cobre (Cu) utilizado por los egipcios para purificar el agua, o el mercurio (Hg), arsénico (As) y antimonio (Sb) utilizados por Paracelso como diuréticos. A principios del siglo XX, el arsénico (como arsfenamina) se utilizó para el tratamiento de la sífilis, el antimonio como antiparasitario y el oro para la tuberculosis.

En la medicina actual los elementos metálicos están presentes en varias áreas que comprenden:

- *Elementos esenciales y tóxicos:* los elementos esenciales juegan un papel crucial en procesos biológicos que se desarrollan en nuestro organismo. El buen funcionamiento de éste depende del mantenimiento de una concentración adecuada de los mismos, ya que tanto el defecto como el exceso pueden causar daños importantes. Los elementos tóxicos son totalmente perjudiciales y, por ello, es necesaria su eliminación a través de lo que se conoce como terapia de quelatación.
- *Agentes terapéuticos:* incluyen todos los compuestos de elementos metálicos que se utilizan para el tratamiento de las diversas enfermedades.
- *Técnicas de imagen:* los elementos metálicos pueden ser utilizados en el diagnóstico de numerosas enfermedades a través de diversas técnicas de imagen.

Estas son las áreas de la Medicina a las que más contribuye la Química Bioinorgánica, aunque no son las únicas y basta para ello mencionar que alguno de los medicamentos orgánicos conocidos no tienen un efecto terapéutico puramente orgánico. Su objetivo en el organismo es, en muchas ocasiones, el secuestrar el elemento metálico de una metaloenzima y, así, inhibir su acción que puede ser clave en muchos



La Arsfenamina fue comercializada en 1910 bajo la marca de Salvarsan.

procesos biológicos. A este tipo de compuestos se les denomina inhibidores de enzimas y a él pertenecen muchos medicamentos como antibióticos, antiinflamatorios, anticancerígenos, etc., como es el caso de las bleomicinas. Éstas se utilizan no solo como antibióticos, sino también en el tratamiento del cáncer. Su mecanismo de acción consiste en la coordinación al centro de hierro de una enzima clave en procesos biológicos.

Existen otros ejemplos significativos, como las aplicaciones del titanio; este elemento, a pesar de no ser esencial para el organismo, es altamente biocompatible lo que lo hace idóneo para su utilización en implantes dentales, prótesis, marcapasos, catéteres de larga duración, etc.

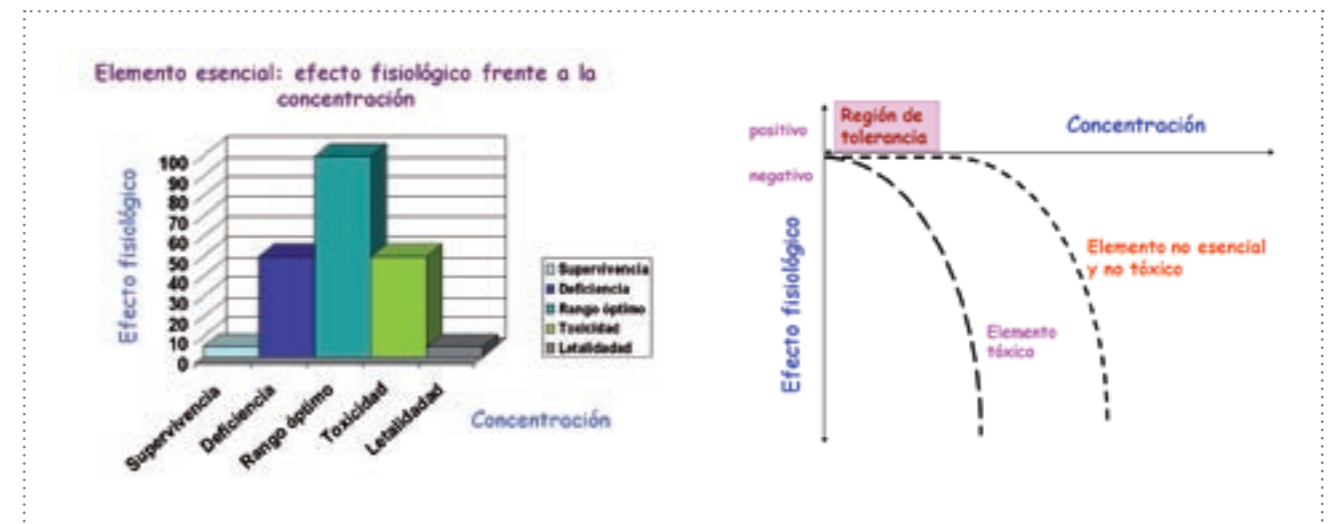


Prótesis de titanio.

ELEMENTOS ESENCIALES Y TÓXICOS

Si nos fijamos en la Tabla Periódica de los elementos, encontramos un gran número de metales, principalmente de la primera serie de transición, que son esenciales para el organismo y se encuentran en éste en cantidades muy pequeñas. Estos metales desarrollan procesos biológicos indispensables para la vida humana

y deben encontrarse en nuestro organismo en una concentración óptima ya que, tanto la deficiencia como el exceso de los mismos, causan numerosas enfermedades y desarreglos y, en concentraciones extremas, pueden causar incluso la muerte. Uno de los casos más habituales es la deficiencia de hierro que causa anemia, o el exceso que provoca una enfermedad llamada hemocromatosis y que debe tratarse por los grandes riesgos que conlleva por la acumulación de hierro en el hígado. En general, la deficiencia de un oligoelemento es un proceso fácilmente reversible, a través de la ingesta de



Efecto fisiológico frente a la concentración para elementos esenciales, no esenciales y tóxicos.

complementos que contengan el elemento, por ejemplo la toma de hierro en forma de una de sus sales, FeSO_4 .

Existen, en algunos casos, deficiencias que son congénitas, como la deficiencia de cobre en el organismo, denominada enfermedad de Menkes. Esta enfermedad es un proceso neurodegenerativo progresivo, propio de la infancia, que se hereda con carácter recesivo ligado al cromosoma X. Involucra un suministro deficiente de cobre a las enzimas cobre-dependientes, que se hace a través de la proteína de Menkes. En la célula, el cobre es captado por la metalotioneína para luego ser enviado a la sangre a través de la proteína de Menkes. El déficit congénito de esta proteína lleva a una acumulación del cobre en la célula y a la incapacidad de suministrar el cobre necesario para los demás órganos. La clínica mostrada por esta enfermedad es un deterioro neurológico progresivo y rápido, en el que se destaca la desconexión total con el medio, retraso mental intenso, hipotonía severa, crisis convulsivas, etc. El pelo puede servir como diagnóstico de la enfermedad ya que es escaso, quebradizo y ensortijado.

El mejor tratamiento para estos pacientes es una detección temprana de la enfermedad y el suplemento de cobre por medio del histidinato de cobre, que ha demostrado ser eficaz en la prevención del deterioro neurológico, sobre todo si se comienza a tratar en el periodo neonatal o preferiblemente fetal. El tratamiento debe mantenerse de por vida y, si no se trata la enfermedad, es mortal.

Tanto los elementos metálicos esenciales en exceso, como los no esenciales o los tóxicos, pueden estar presentes en el organismo por varios motivos, desde desordenes metabólicos, contaminación ambiental, ingesta accidental, etc. Estos elementos producen un efecto fisiológico negativo que se puede traducir en graves enfermedades y, por ello, existe una terapia para este tipo de desórdenes que se denomina "Terapia de quelatación". Esta consiste en la eliminación del elemento tóxico para el organismo a través de la introducción de un ligando, generalmente quelato, la formación de un complejo metálico, que es menos tóxico que el metal y, finalmente, la eliminación de este complejo metálico a través de la vía renal o biliar. Esta terapia tiene su origen en la búsqueda, por parte de los ingleses, de un antídoto para el gas de guerra Lewisita ($\text{ClCH}=\text{CHAsCl}_2$), creado antes de la 2ª Guerra Mundial, pero que no llegó a utilizarse. El antídoto encontrado fue el compuesto 2,3-dimercaptopropanol, conocido con las siglas BAL (British anti-lewisita), y fue el primero de una serie de quelatos aprobados como fármacos y que se pueden utilizar en caso de envenenamientos con metales. En la figura se pueden ver la nueva generación

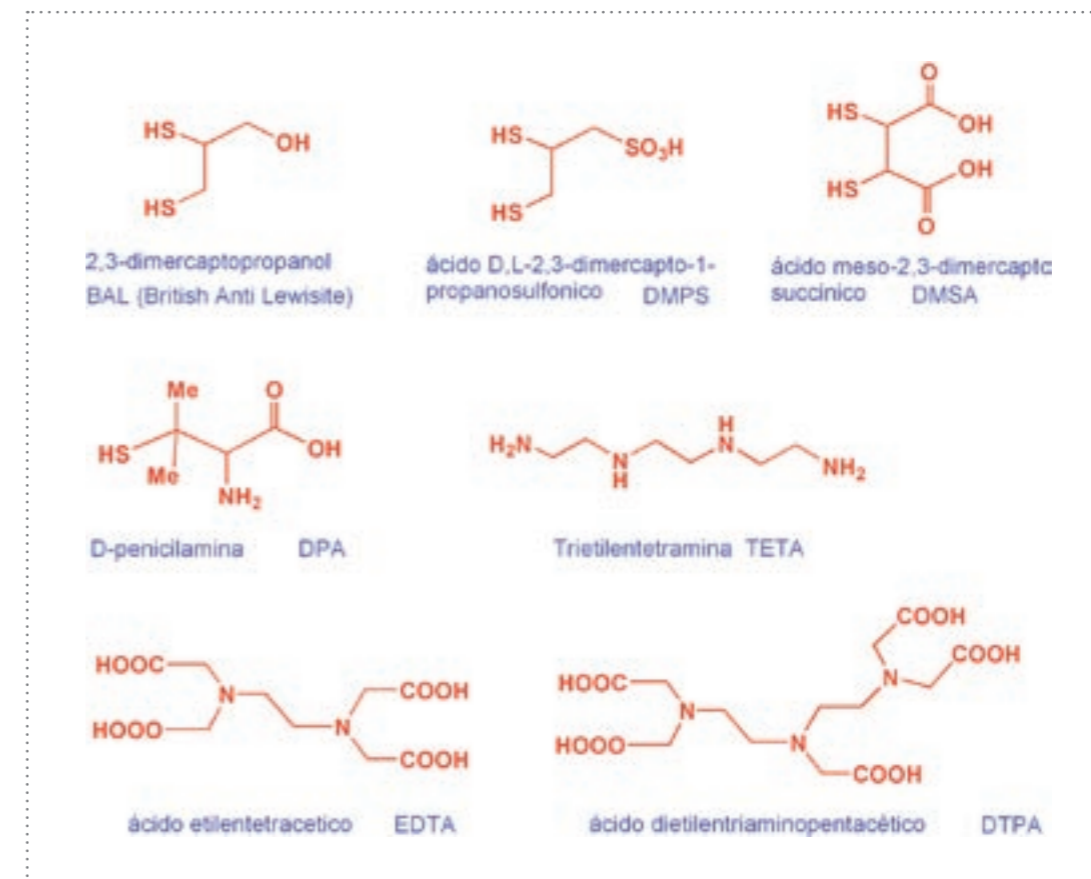
de este tipo de quelatos DMPS y DMSA que son más efectivos para la eliminación de metales pesados como mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As), etc. y son menos tóxicos. La D-penicilamina (DPA) se utiliza, fundamentalmente, en la enfermedad de Wilson que, al igual que la de Menkes, es una enfermedad genética que consiste en la imposibilidad, por parte del organismo, de eliminar el exceso de cobre, con la consecuente acumulación del mismo en diferentes órganos como el hígado, el cerebro y la córnea. Algunos pacientes que no toleran bien la DPA pueden ser tratados con otros quelatos como la trietilentetramina (TETA). Hay otra serie de ligandos quelato que se pueden utilizar en casos de envenenamiento con otros metales, como son los ácidos aminocarboxílicos, como el ácido etilentetracético (EDTA) utilizado para eliminar cobalto

“En la Tabla Periódica de los elementos, encontramos un gran número de metales, principalmente de la primera serie de transición, que son esenciales para el organismo y se encuentran en éste en cantidades muy pequeñas.”

(Co), níquel (Ni), manganeso (Mn), o el ácido dietiltri Aminopentacético para la sobreexposición a sustancias radiactivas de plutonio o uranio. La deferoxamina (Desferal) para eliminar el exceso de hierro e incluso de aluminio (Al). En este sentido se ha observado que existe una acumulación de aluminio en el cerebro en los enfermos de Alzheimer y, aunque se ha probado la eliminación por medio de quelatos, el resultado ha sido que el Al se elimina de otros órganos, pero no del cerebro.



Hipotonía: un síntoma de la enfermedad de Menkes.



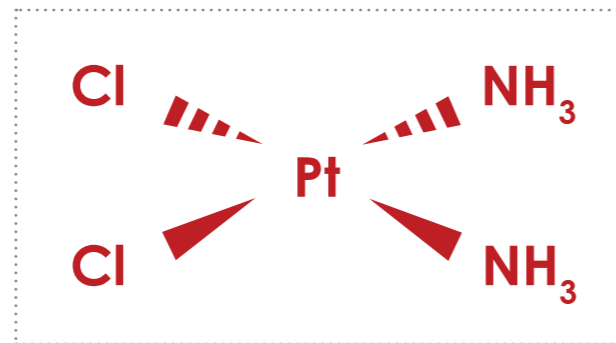
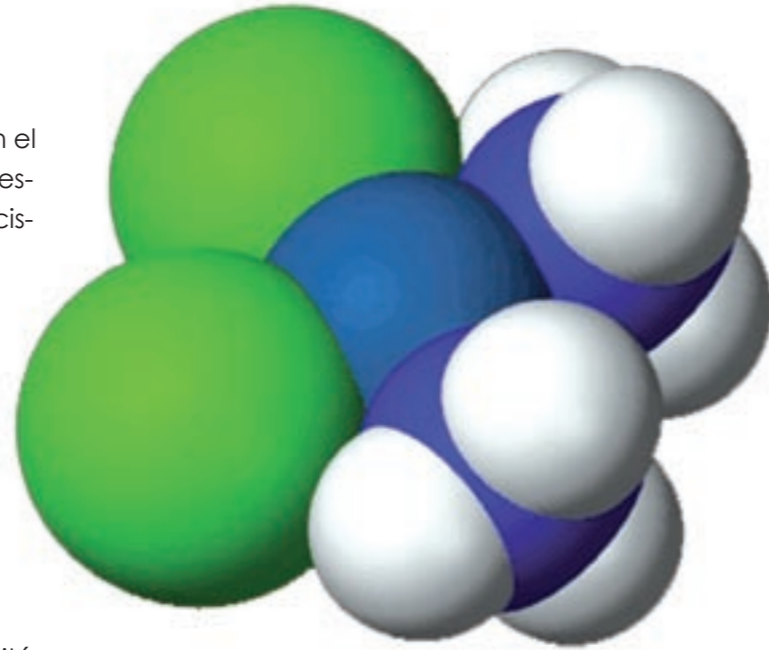
Algunos compuestos utilizados en Terapia de Quelatación.

AGENTES TERAPÉUTICOS

Compuestos anticancerígenos

La aplicación de compuestos metálicos en el tratamiento del cáncer se inicia con el descubrimiento de la actividad citotóxica del cisplatino, $\text{cis-}[PtCl_2(NH_3)_2]$, en 1965. Este compuesto fue preparado, por primera vez, en 1845 por Peyrone y su estructura deducida por Werner en 1893. Barnett Rosenberg estaba estudiando el efecto del campo eléctrico sobre el crecimiento de la bacteria *Escherichia coli*, utilizando un electrodo de platino, cuando observó que se producía la inhibición de la división celular, bajo la acción del campo eléctrico. Necesitó de una gran labor de investigación para saber que la inhibición celular no la producía el campo eléctrico, sino que parte del platino del electrodo había pasado al medio de cultivo, donde había cloruro de amonio (NH_4Cl), y formado, así, el complejo *cis*-diclorodiaminoplatino(II).

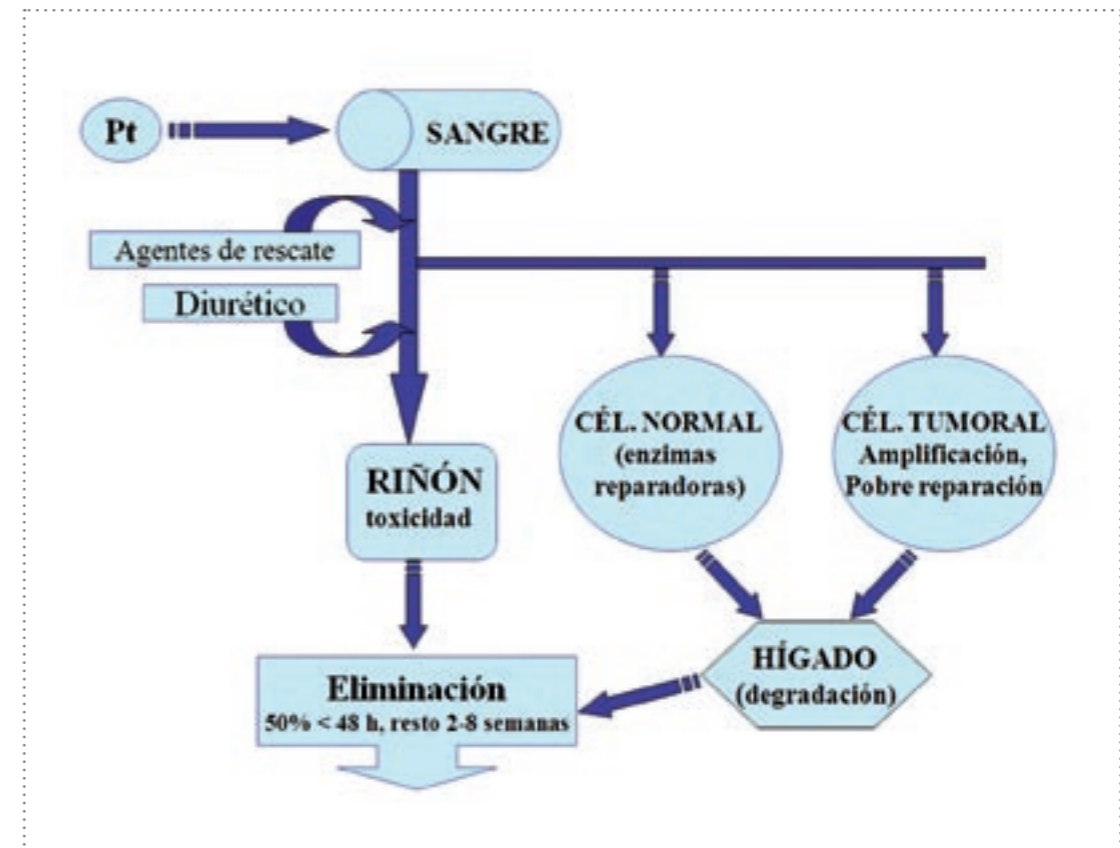
Inicialmente, le resultó difícil convencer al *National Cancer Institute* de que un compuesto de un metal pesado podría ser adecuado para el tratamiento del cáncer, así que comenzó la segunda etapa de investigación en compuestos anticancerígenos, las pruebas en animales, en su propio laboratorio. Los resultados obtenidos en ratones fueron espectaculares, como indica la publicación en 1968 de los mismos en la revista *Nature*. La fase clínica del cisplatino fue difícil, ya que los efectos secundarios estuvieron a punto de impedir que se continuase su estudio. Estos problemas consistían, fundamentalmente, en náuseas, vómitos y acumulación del metal en el riñón. Para todo ello se encontraron soluciones aceptables que consistían en la utilización de dosis menores, sin afectar a la actividad, y el uso de una terapia de hidratación con diuréticos para evitar el daño renal. En caso necesario, se podía utilizar un agente antiemético para evitar las náuseas y un agente de rescate (que-



Estructura del cisplatino.

lato) para eliminar el platino del riñón. Con todo ello, el genérico cisplatino, nombre comercial Platinol, fue aprobado como fármaco en 1978 y, desde entonces, se ha convertido en uno de los medicamentos anticancerígenos más vendidos. Es activo, principalmente, en cáncer de genitales, especialmente para el cáncer de testículos puede llegar a una cura superior al 90%, incluso con metástasis.

La investigación llevada a cabo en complejos de platino para el cáncer ha dado lugar a medicamentos de segunda y tercera generación, como el carboplatino, muy utilizado en cáncer

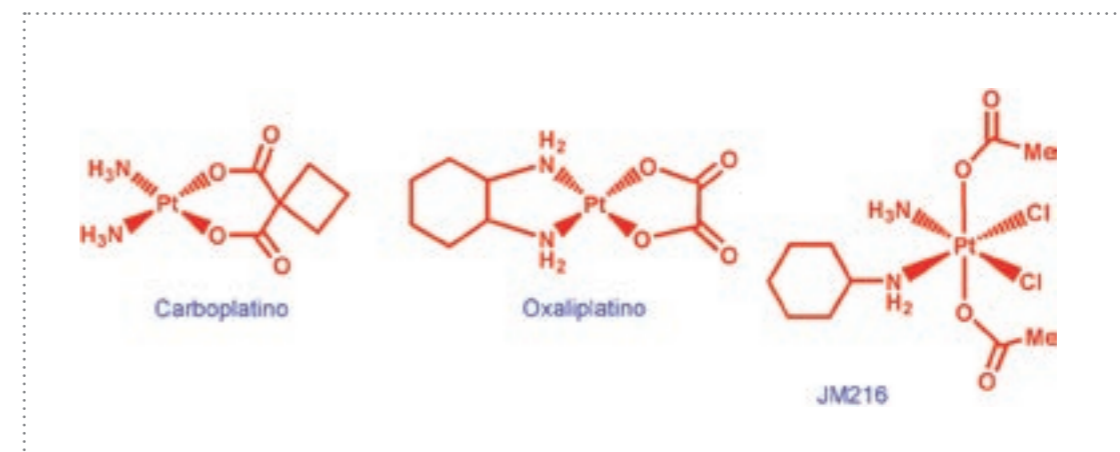


Evolución fisiológica del cisplatino.

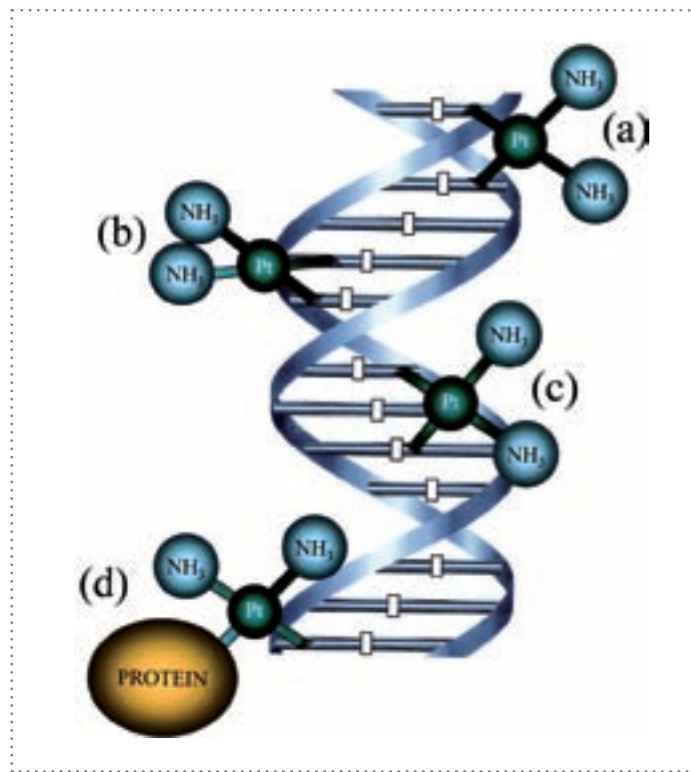
de ovario, el oxaliplatino, muy activo en cáncer de colon en combinación con el 5-fluoracilo o el compuesto de platino(IV) (JM216) adecuado para una administración oral.

Grande ha sido el esfuerzo en elucidar el mecanismo de acción de esta droga, llegándose a la conclusión de que la diana biológica del cisplatino es la molécula de ADN, donde el pla-

tino se coordina preferentemente a la guanina y a la adenina, con mayor porcentaje de coordinación a dos guaninas conjuntas de la misma cadena. Esta coordinación del metal provoca distorsiones irreparables en la cadena de ADN, de forma que el sistema de reparación de nucleótidos es incapaz de reparar el daño causado, y se pone en marcha la muerte celular programada o apoptosis.



Fármacos de platino de segunda y tercera generación.



Coordinación del cisplatino a la doble hélice del ADN.

posteriores evidenciaron una gran inestabilidad de los mismos en el medio biológico. Más prometedores son los complejos de rutenio (Ru), NAMI-A y KP1019 (ver figura), que se encuentran en fase de estudios clínicos y son muy activos en diversos tipos de cáncer, algunos resistentes al cisplatino, con metástasis.

Compuestos antiartríticos de oro

El oro se conoce desde la Antigüedad. Desde las primeras civilizaciones, su color amarillo-rojizo, distinto de otros colores naturales, y su inalterabilidad frente a los agentes atmosféricos o fluidos corporales, hacen que se le asocie con la divinidad (dios sol) y con la inmortalidad. Es frecuente la utilización de amuletos de oro para ahuyentar los malos espíritus desde las primeras civilizaciones, y tampoco faltan las propuestas de ingesta de oro, finamente dividido o en forma de elixires. Wei Boyan (siglo II a.C., China) ya afirma que "se puede ingerir para conseguir la longevidad" y, desde entonces, no faltan recetas para conseguir polvo de oro que, convenientemente mezclado con sales minerales y zumos de frutas, tiene un sabor agradable. El descubrimiento del agua regia (mezcla de

El éxito de los compuestos de platino en el tratamiento del cáncer propició la investigación en otros compuestos metálicos. Los complejos de titanio del tipo $[TiCp_2Cl_2]$ (Cp = ciclopentadienilo) demostraron una gran actividad *in vitro* en cánceres gastrointestinales, pero los estudios

afirma que "se puede ingerir para conseguir la longevidad" y, desde entonces, no faltan recetas para conseguir polvo de oro que, convenientemente mezclado con sales minerales y zumos de frutas, tiene un sabor agradable. El descubrimiento del agua regia (mezcla de

ácido clorhídrico y nítrico), hacia 1300 permite obtener disoluciones de oro y la comercialización de elixires con nombres como *Goldwasser*, *Aurum Potabile* o *Life Preserving Drops* que se proclama sirven para curar la melancolía, debilidad, alcoholismo, sífilis...

No obstante, la moderna crisoterapia (del griego, *crisos*, oro) surge tras el descubrimiento por Robert Koch (1890) de que el compuesto de oro $K[Au(CN)_2]$ tenía propiedades bactericidas. El mismo Koch descubre que los enfermos con artritis reumatoide mejoran sensiblemente tras el tratamiento con compuestos de oro. En la actualidad, es la principal aplicación médica de este metal.

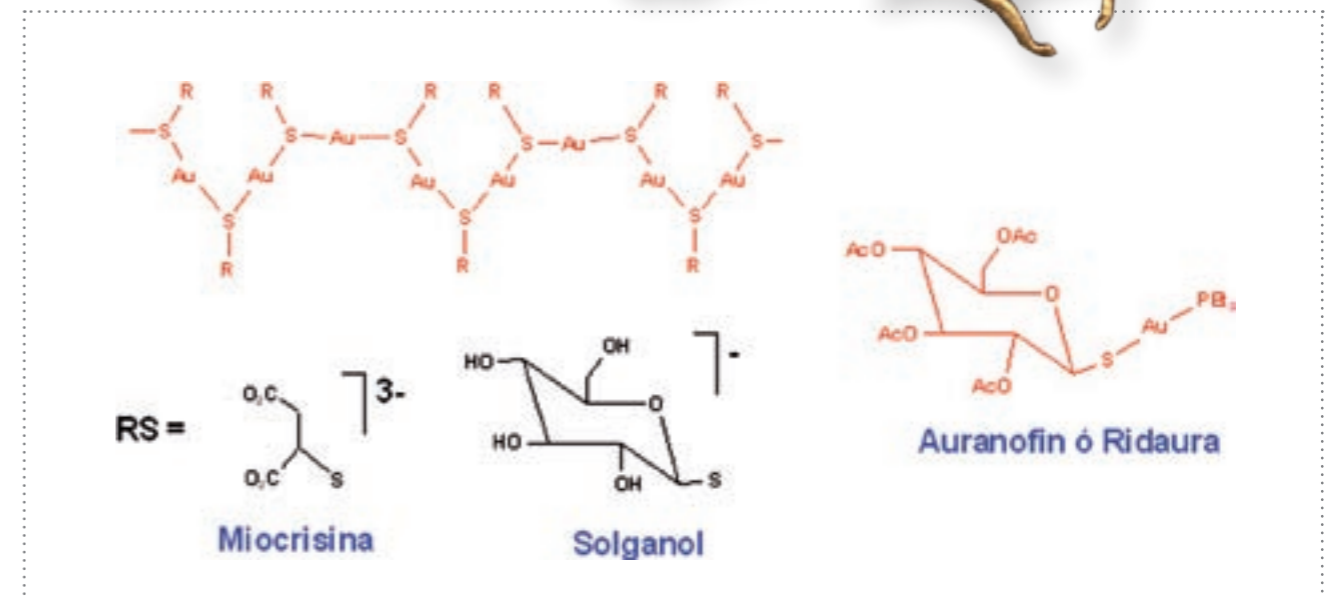
La artritis reumatoide es consecuencia de un mal funcionamiento del sistema inmunológico, que se traduce en la inflamación y progresiva erosión de las articulaciones. Puede acabar en graves deformaciones e inmovilidad

de la articulación. Al parecer, los compuestos de oro son capaces de inhibir la acción de los enzimas, que provocan la degradación, y evitar la producción de especies oxigenadas (superóxidos y radicales hidróxido), que contribuyen al deterioro del cartílago o del hueso. Los compuestos que se utilizan actualmente son tiolatos de oro (*Miocrisina* o *Solganol*) y, particularmente, el *Auranofin* (ver figura). Al entrar en el torrente sanguíneo, tioproteínas, como la albúmina, son las encargadas de provocar el desplazamiento de alguno de los ligandos (fosfinas, tioles) y de transportar al oro hasta las células. La entrada del oro en las mismas se produce, también, gracias a la acción de tioproteínas.



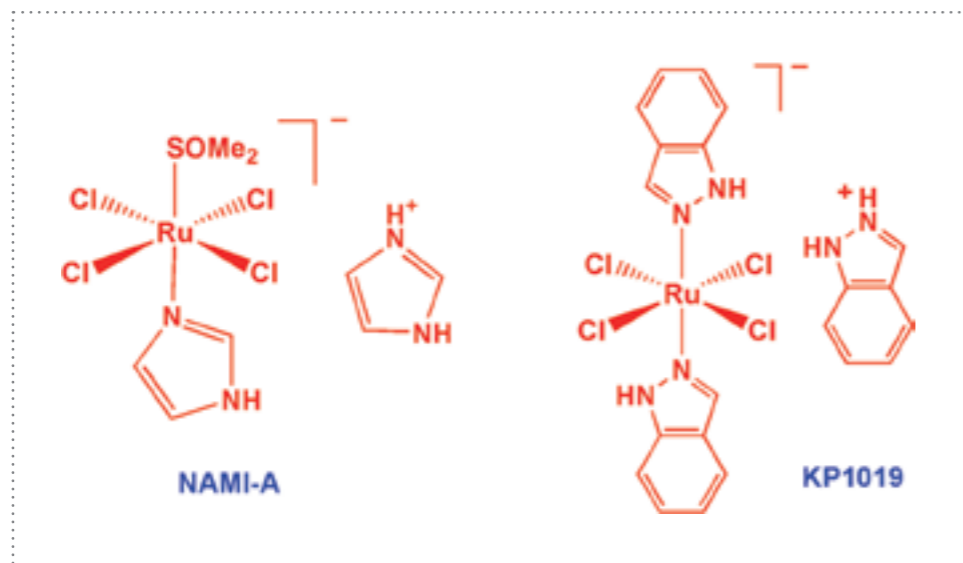
Amuleto del antiguo Egipto.

*ny-image3.etsy.com



Compuestos de oro y nombres comerciales que se usan en el tratamiento de la artritis reumatoide.

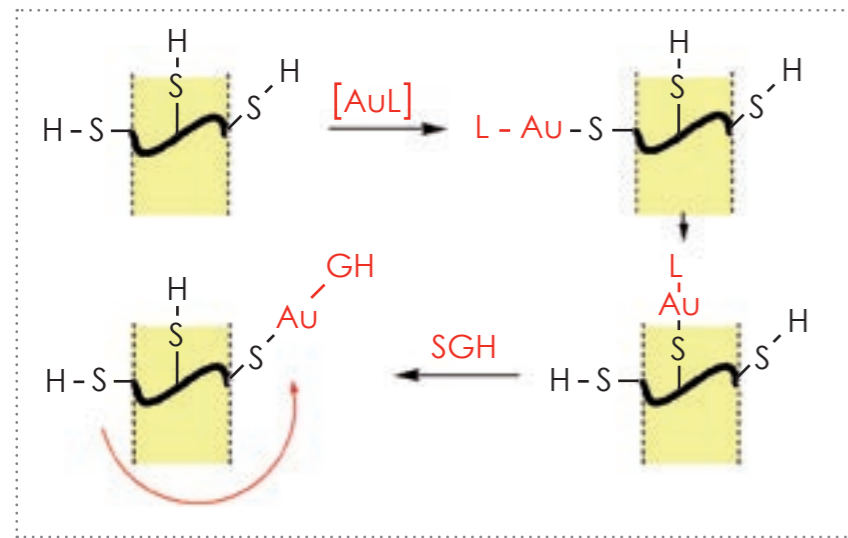
Compuestos de rutenio antitumorales en fase de estudios clínicos.



Agentes antimicrobianos

La utilización de plata como biocida se remonta a antiguas civilizaciones, que la utilizaban para la fabricación de utensilios de cocina y recipientes para guardar el agua. La práctica de instilar unas gotas de una disolución al 1 % de Nitrato de plata AgNO_3 en los niños recién nacidos para prevenir la oftalmia neonatal todavía se realiza en algunos países. La plata es activa en muy bajas dosis y posee una toxicidad muy baja. En la medicina moderna se utiliza la

sulfadiazina de plata, un compuesto insoluble que libera iones plata lentamente, en forma de crema (Silverdema, Flamazine, etc.) para prevenir infecciones por bacterias y levaduras, en quemaduras de segundo y tercer grado. Las nanopartículas de plata son también muy eficaces frente a un amplio rango de bacterias, hongos y levaduras y están siendo muy utilizadas en la fabricación de material hospitalario.



Esquema de penetración del oro en las células (L = SR ó PEt_3 , GSH = glutatióna).

Actualmente se estudian otras potenciales aplicaciones de compuestos de oro(I) y oro(III) en el tratamiento del asma, como agentes bactericidas y antivíricos o agentes anticancerígenos (de momento, *in vitro* o con pequeños animales). El oro metal se utiliza para pequeños implantes (oído medio) o en forma de hilo, para proteger venas o arterias débiles o en cirugía plástica.

Los compuestos de antimonio se han utilizado también en medicina, desde hace varios siglos, como agentes eméticos. Los compuestos de antimonio (III) son, en general, más tóxicos que los de antimonio (V). Existen dos fármacos de antimonio que son efectivos para el tratamiento de la Leishmaniosis, una enfermedad grave causada por parásitos intracelulares que afecta, sobre todo, a animales y, muy raramente, al hombre. Estos compuestos son de antimonio(V) como el estibogluconato sódico (Pentostam) y de antimonio(III), como el antimoniato de meglimina (Glucantime).

Otro elemento, cuyos compuestos se han utilizado en medicina desde la Antigüedad para el tratamiento de problemas gastrointestinales, es el bismuto. Normalmente, son sales de bismuto(III) como el citrato, salicitato o el subcitrato de bismuto coloidal. Actualmente, se utilizan en el tratamiento de úlceras gástricas producidas por la bacteria *Helicobacter pylori*, normalmente combinado con otros antibióticos. La actividad antimicrobiana de las sales de bismuto puede deberse a la unión del bismuto a proteínas y enzimas.

“La medicina moderna demanda, cada vez más, métodos y técnicas que permitan un diagnóstico exacto del estado de una determinada enfermedad, lo que está contribuyendo al desarrollo de nuevas y más eficaces técnicas de imagen.”

En muchas de estas técnicas, la calidad de la imagen se puede potenciar mediante la administración de compuestos metálicos. Este es el caso, por ejemplo, de la ingesta de sulfato de bario para el estudio del sistema gastrointestinal mediante rayos X, dado que el bario es opaco a este tipo de radiación. El estudio del comportamiento de los protones del agua de los distintos tejidos de nuestro cuerpo, bajo un campo magnético, se puede potenciar mediante la adición de compuestos paramagnéticos de metales de transición o lantánidos. Por otro lado, para estudiar la radiación γ que se escapa de un determinado órgano, es necesario que previamente se haya administrado un compuesto radiactivo emisor γ .

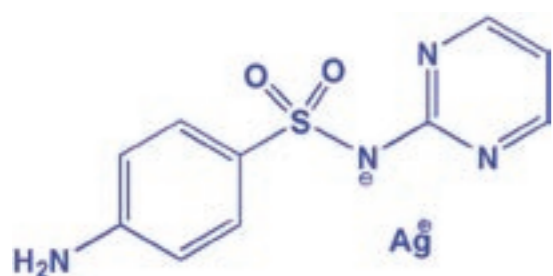
A continuación, resumiremos el alcance de estas dos últimas técnicas, desde un punto de vista fundamentalmente químico:

Gammagrafía

Los isótopos radiactivos pueden emitir radiación α , β o γ . Precisamente la radiación γ es la más penetrante, pudiendo atravesar perfectamente el cuerpo humano. Se trata de suministrar al paciente un compuesto que contenga un isótopo radiactivo emisor γ (que, a ser posible, se dirija hacia el órgano que se quiere estudiar) y, posteriormente, se analiza la radiación emitida. Con la ayuda de una cámara de detección de rayos γ y de un apropiado sistema informático, que transforme las señales recibidas

TÉCNICAS DE IMAGEN

La medicina moderna demanda, cada vez más, métodos y técnicas que permitan un diagnóstico exacto del estado de una determinada enfermedad, lo que está contribuyendo al desarrollo de nuevas y más eficaces técnicas de imagen. Las imágenes que necesita el médico se pueden producir mediante el estudio de la absorción de una determinada radiación aplicada externamente (es el caso de técnicas como rayos X, ultrasonidos o la resonancia magnética de imagen (RMI)) o mediante la administración de pequeñas cantidades de un compuesto radiactivo y posterior estudio de la radiación que escapa del cuerpo (p.e. gammagrafía).



Sulfadiazina de plata e imagen de nanopartículas de plata con bacterias.



en imágenes, se pueden obtener excelentes representaciones de los distintos órganos estudiados en las que el médico puede apreciar las zonas dañadas.

No es el único, pero el isótopo más utilizado en la actualidad es el ^{99m}Tc . Se trata de un emisor γ de 141 keV, que es una energía próxima a la óptima de detección de las gamma-cámaras que se comercializan actualmente (150keV). El tecnecio no es un elemento natural (fue el primer elemento que se preparó artificialmente y todos sus isótopos son radiactivos), pero se está produciendo en los reactores nucleares. Para generar ^{99m}Tc se utiliza ^{99}Mo . Las reacciones nucleares, así como la descomposición del tecnecio, se recogen en la figura. El isótopo nuclear metaestable ^{99m}Tc se descompone al ^{99}Tc , mediante la emisión de rayos γ . Debe notarse que tanto el ^{99}Mo como el ^{99}Tc son emisores β y, por lo tanto, deben extremarse las precauciones en su manipulación.

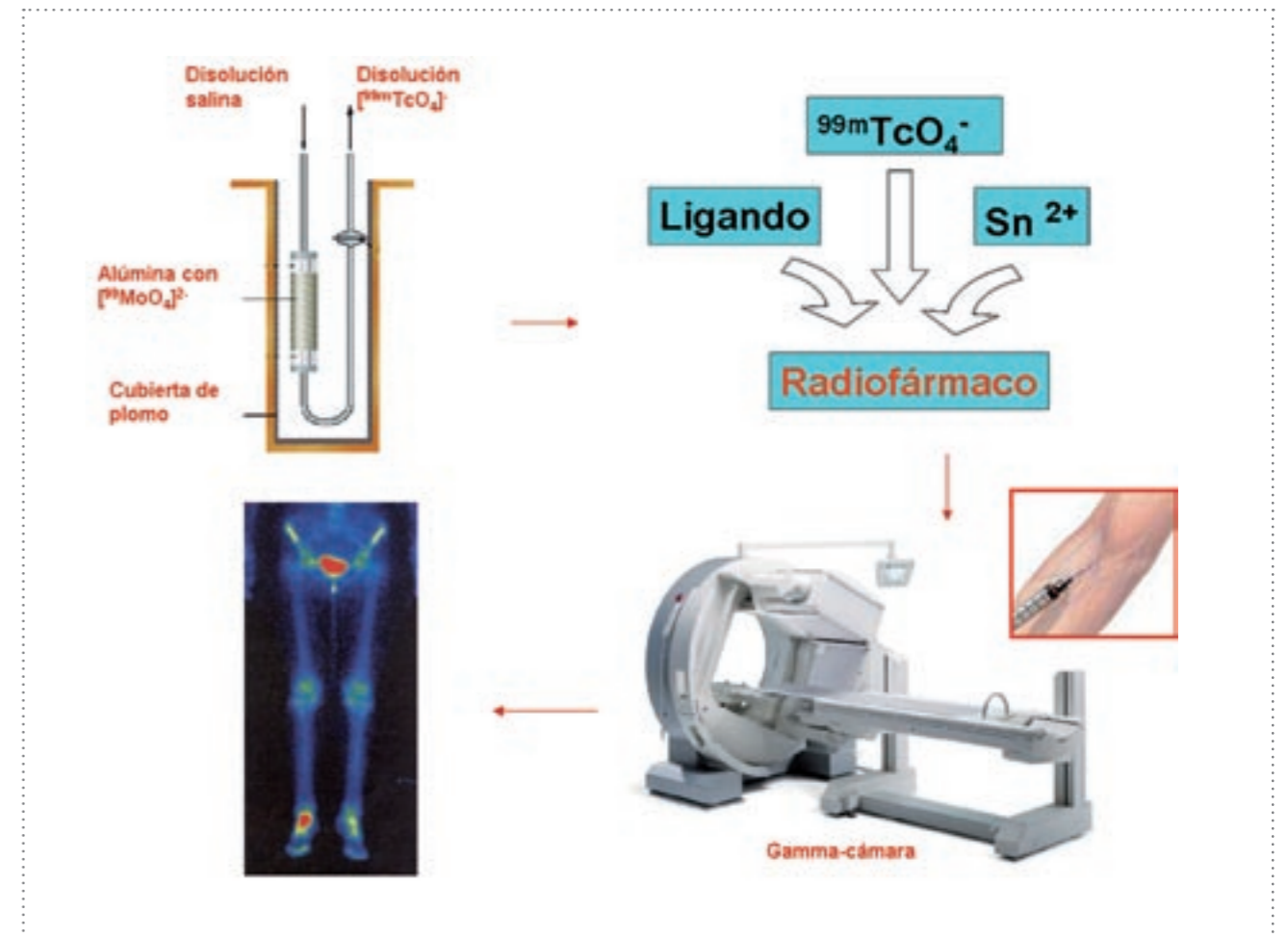
El molibdeno se encuentra, en forma de $[\text{MoO}_4]^{2-}$, retenido en una columna de intercambio de alúmina. Al añadir suero fisiológico, éste disuelve el $[\text{TcO}_4]^-$ formado. La disolución, sin embargo, es muy diluida (10^{-7} - 10^{-8} M).

Estas disoluciones ya se podrían utilizar como tales. Por ejemplo, el $[\text{TcO}_4]^-$ tiene un comportamiento parecido al $[\text{IO}_4]^-$ y se acumula en el tiroides, por lo que se puede suministrar para estudiar este órgano. Sin embargo, lo más frecuen-

te es que, a partir de las disoluciones anteriores, se preparen los radiofármacos apropiados. Se trata de sintetizar compuestos de tecnecio que sean capaces de dirigirse preferentemente al órgano que se desea estudiar y no a otros. No es una tarea fácil, si se tiene en cuenta que partimos de disoluciones muy diluidas y de que el tiempo de que se dispone es pequeño, dada la corta vida media del isótopo nuclear ^{99m}Tc . Por lo tanto, la preparación del radiofármaco hay que hacerla muy rápidamente y no se dispone de tiempo para la caracterización del compuesto final. Técnicas como espectroscopia IR, RMN o difracción de rayos X no son aplicables en este caso.

Muy frecuentemente, en el compuesto que se desea obtener, el tecnecio debe de encontrarse en estado de oxidación inferior a VII. Por ello, se añade un reductor que generalmente es una sal de Sn^{2+} . Se adiciona también un ligando que va a permitir no solo la formación de un complejo estable, sino que también va a ser responsable de trasladar al tecnecio hacia el corazón, hígado, sistema óseo..., es decir, al órgano que se desea estudiar y no a otros. Se pueden añadir otros reactivos, por ejemplo, para ajustar las condiciones de pH. La reacción debe de ser muy rápida, por lo que todos esos reactivos se adicionan a la vez y en gran exceso.

La biodistribución depende del complejo formado (de la naturaleza del ligando, tamaño, car-

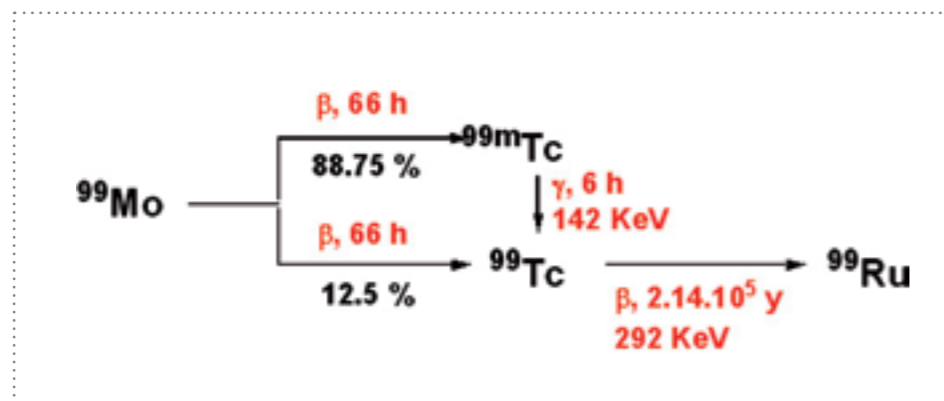


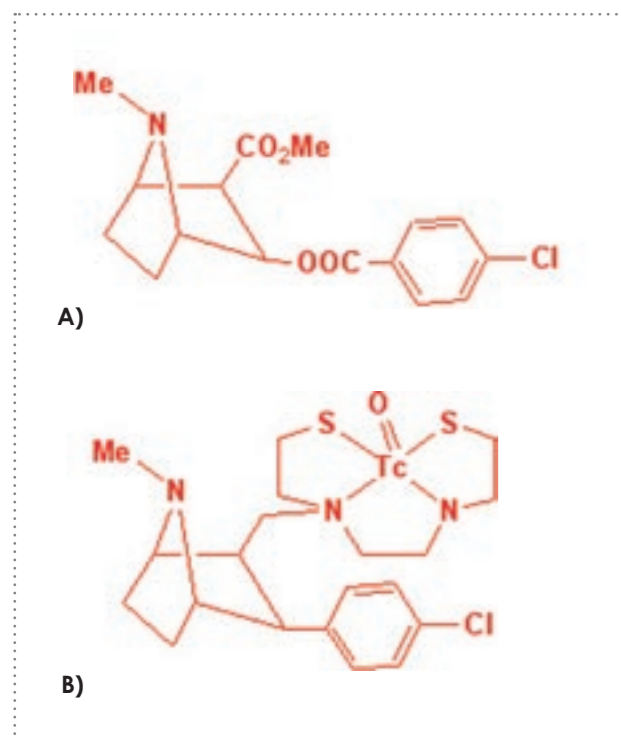
Secuencia de realización de una gammagrafía: Generador de ^{99m}Tc . Preparación del radiofármaco. Estudio en la gamma-cámara e imagen de extremidades inferiores.

ga) y permite que se concentre preferentemente en un órgano u otro. Por ejemplo, mediante la utilización de metildifosfonato (H_2MDP), a un pH apropiado, se prepara una disolución de $[\text{Tc}^{\text{IV}}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{MDP})_2]$ que se fija preferentemente en los huesos, gracias a la coordinación de los oxígenos de los grupos fosfonato a los centros de calcio del hidroxiapatito. Hay una mayor acumulación en las zonas dañadas, pues es allí donde hay una mayor concentración de calcio. De esta forma, se pueden obtener gammagrafías, como la que se recoge en la figura. Se trata de un paciente con lesiones en las articulaciones de las extremidades inferiores. El tecnecio se elimina por la orina, como se puede apreciar por la mayor concentración en la vejiga.

Se trata de un tema de investigación todavía muy abierto para el químico, con dos retos principales. El primero, conocer mejor la naturaleza de los radiofármacos, lo que se puede lograr trabajando con isótopos de tecnecio más estables, como el ^{99}Tc o con otros elementos con un comportamiento similar, como el renio. El segundo reto consiste en preparar compuestos que se dirijan solamente al órgano que se desea estudiar. Por ejemplo, es conocido que la cocaína o derivados bloquean los sitios de transportadores de dopamina en el cerebro, por lo que la inserción de tecnecio en algún sustituyente puede facilitar su transporte para un estudio posterior del Parkinson.

Esquema de obtención y desintegración de ^{99m}Tc





A) Molécula de cocaína.
B) Molécula de estructura similar con Tc.

Resonancia Magnética de Imagen (RMI)

Es también una técnica de gran importancia en diagnóstico clínica, que busca aumentar el contraste entre las distintas partes de un tejido normal o enfermo. Se basa en el estudio de las señales que producen los protones del agua, bajo la acción de un campo magnético. Estas señales dependen de los tiempos de relajación que son distintos para las distintas partes del cuerpo, y que se pueden alterar por la presencia en las proximidades de metales de transición paramagnéticos. Los complejos de metales paramagnéticos pueden disminuir los tiempos de relajación de los protones próximos a través de interacciones bipolares. En la Resonancia Magnética de Imagen no se visualizan directamente los protones, sino los cambios en la relajación de los mismos, por lo que la presencia de iones paramagnéticos da lugar a señales de mayor intensidad. Todo ello,

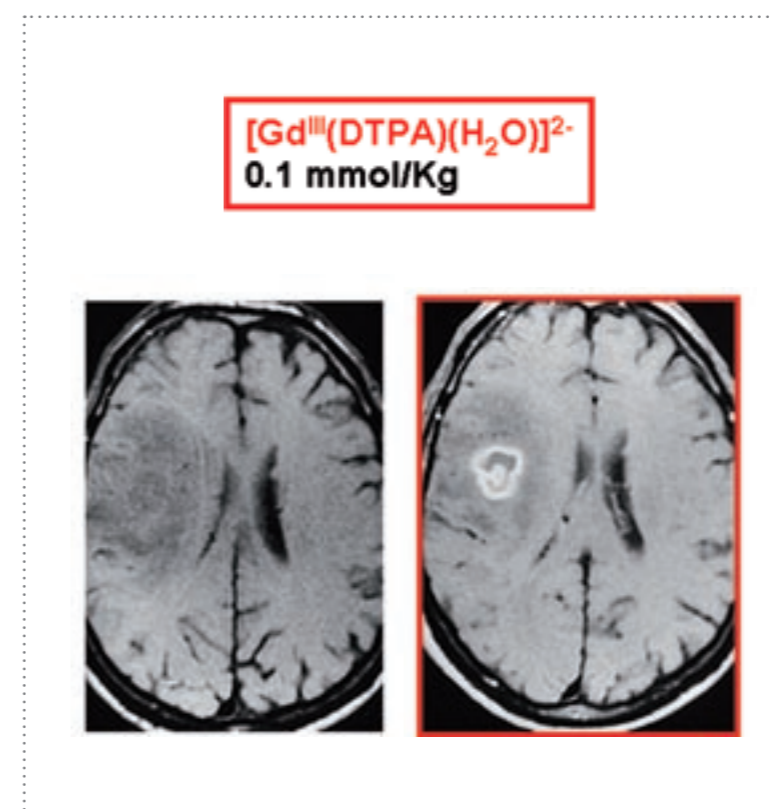
convenientemente computerizado, se traduce en unas imágenes bidimensionales que ayudan al diagnóstico.

En estos estudios se utilizan compuestos de metales con un elevado número de electrones desapareados, principalmente gadolinio(III), hierro(III) o manganeso(II). Los compuestos de estos iones deben de ser: a) Biocompatibles, solubles en agua y estables. b) Eficaces en la relajación de los protones a una dosis en la que no sean tóxicos. c) Apropriados para una específica biodistribución *in vivo*, de manera que se acumulen en el tejido que se pretende estudiar. d) Estables, tanto los compuestos como sus metabolitos, no tóxicos y fácilmente excretables.

Generalmente, los metales de transición son tóxicos. Por ello conviene que se administren en forma de un compuesto estable, con baja tendencia a la disociación en los sistemas biológicos. Por ejemplo, $[Gd^{III}(DTPA)(H_2O)]^{2-}$ (DTPA = dietilenaminopentaacetato), que se puede utilizar para el estudio de tumores o edemas cerebrales, es muy estable y se excreta intacto por los riñones. Tiene una baja toxicidad ($LD_{50} = 10-20$ mmol/Kg). Sin embargo, $[Gd^{III}(EDTA)(H_2O)]^{-}$ (EDTA = etilendiaminotetraacetato) es más tóxico, debido a que, probablemente, está totalmente disociado *in vivo* (su toxicidad es comparable a la de $GdCl_3$, $LD_{50} = 0.5$ mmol/Kg). En la figura se recoge la imagen de un paciente que posee un edema cerebral sin (izquierda) y con (derecha) contraste de gadolinio.

RADIOTERAPIA

Además de los isótopos metaestables, emisores γ , como el ^{99m}Tc , que, como acabamos de ver, se usan en gammagrafía, la medicina utiliza otros radiofármacos que son apropiados para la terapia paliativa del dolor o en el tratamiento de determinados tumores. Entre los primeros,



Aparato de Resonancia Magnética de Imagen e imagen de un cerebro realizada sin (izquierda) y con (derecha) contraste.

podemos mencionar al cloruro de estroncio-89 que se utiliza para mitigar el dolor óseo. El ^{89}Sr es un isótopo radiactivo emisor β , que se administra por medio de una inyección intravenosa. Una vez en el torrente sanguíneo, se comporta como el calcio. Se elimina preferentemente por la orina. El renio-186 es un emisor β y γ . Como emisor γ , se puede utilizar también para la adquisición de gammagrafías y, en forma de fosfonatos se fija en los huesos, por lo que se utiliza en el tratamiento paliativo de metástasis ósea.

En el tratamiento de tumores, hay que tener en cuenta que las células cancerosas tienden a reproducirse más rápidamente que las sanas. La radiación destruye más fácilmente a las células que se reproducen con mayor velocidad, por lo que la radioterapia daña más a las células tumorales que a las normales.

Concretamente, la radioterapia altera preferentemente el ADN de las células cancerosas, lo que impide su crecimiento y división. Hay que tener en cuenta que, aunque en menor proporción, también se destruyen células sanas, por lo que hay algún efecto secundario en estos tratamientos. La radioterapia se puede aplicar de dos formas: a) la más utilizada es a través de una fuente externa de radiación de rayos X de alta potencia que se dirige hacia el tumor, o b) mediante la introducción de granos o semillas radiactivas dentro o cerca del tumor (radiación intersticial o braquiterapia). Un aspecto importante de la braquiterapia es que la radiación solo afecta a una zona muy localizada (las partículas α ó β son poco penetrantes), próxima a la fuente de radiación. La exposición a la radiación de los tejidos sanos, más alejados de la fuente, es, por lo tanto, reducida. Así, por ejemplo, la introducción de semillas de oro-198 se utiliza en el tratamiento de tumores cerebrales o de próstata, microesferas de Ytrio-90, en el tratamiento de neoplasias hepáticas o semillas de Iridio-192 en el tratamiento de tumores ginecológicos.

Antonio Laguna y M^o Concepción Gimeno

Dpto. Química Inorgánica
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza

IBONES DEL PIRINEO ARAGONÉS: LAGOS GLACIARES ENTRE AGRESTES MONTAÑAS

**POR JAVIER DEL VALLE,
TOMÁS ARRUEBO, ALFONSO PARDO,
JOSÉ MATESANZ, CARLOS RODRÍGUEZ,
ZOE SANTOLARIA, JAVIER LANAJA Y
JOSÉ URIETA**

Ibón de Marboré, dentro del
Parque Nacional de Ordesa y
Monte Perdido.

*Fotografía por Javier del Valle.

Ibones del Pirineo aragonés: lagos glaciares entre agrestes montañas

En muchos macizos del Pirineo aparecen unas peculiares masas de agua, algunas entre paisajes rocosos de alta montaña, otras en suaves entornos de prados o bosques. Aportan variedad y belleza al paisaje pirenaico, creando ecosistemas dulceacuícolas específicos y de gran interés.

Estos lagos suelen estar helados gran parte del año y, aunque su estado de conservación, al igual que su accesibilidad, es muy diverso, en los últimos años han despertado un nuevo interés social, no solo por su interés científico y medioambiental, sino por su belleza y el potencial turístico y deportivo que tienen, lo que ha motivado diversas campañas de limpieza, acondicionamiento e investigación.

ORIGEN, EVOLUCIÓN NATURAL Y LOCALIZACIÓN

El origen de los lagos glaciares del Pirineo se sitúa hace unos 10.000 años, en el tránsito del último glaciar (Würm) al periodo interglaciar actual (Pascual *et al.*, 2000; Ehlers y Gibbard, 2004). En los periodos de mayor extensión de

las masas glaciares, éstas ejercían una fuerte presión en las zonas de escasa pendiente, lo que producía una erosión del sustrato y la formación, mediante este proceso, de zonas más deprimidas que su entorno, denominadas cubetas de sobreexcavación glaciar. El posterior retroceso de los glaciares dejó dichas cubetas desprovistas de hielo, por lo que el agua de fusión y de lluvia se acumuló en ellas formando estos lagos.

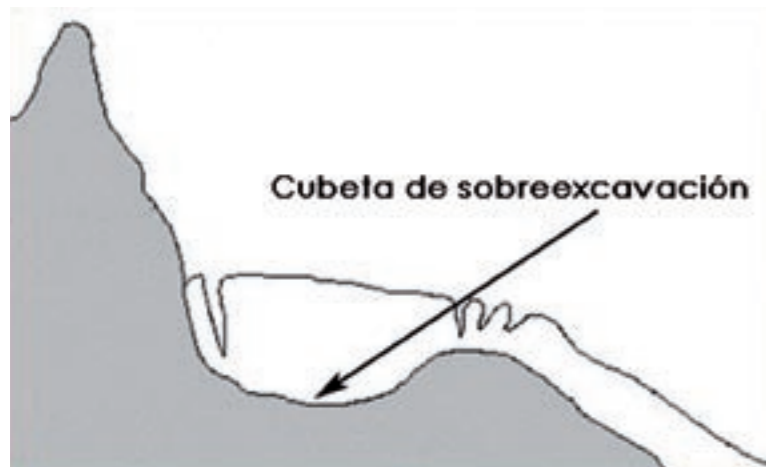
Ibones y otras morfologías glaciares son, por lo tanto, resultado del intenso retoque glaciar que sufrió buena parte de la cordillera pirenaica durante la última glaciación.

Los lagos de origen glaciar en los Pirineos son abundantes en los sectores central (aragonés) y oriental (catalán) de la cordillera. En Aragón se denominan ibones y en Cataluña estanyes. En el Pirineo francés también abundan, denominándose en este caso lagos.

Los ibones están alimentados por el agua de lluvia y fusión de la nieve que les llega a través de pequeños arroyos, y en ocasiones por alguna surgencia subterránea, y habitualmente

desaguan a través de otra corriente de agua, por lo que suelen estar conectados con la red fluvial. Las aguas que los alimentan también transportan sedimentos

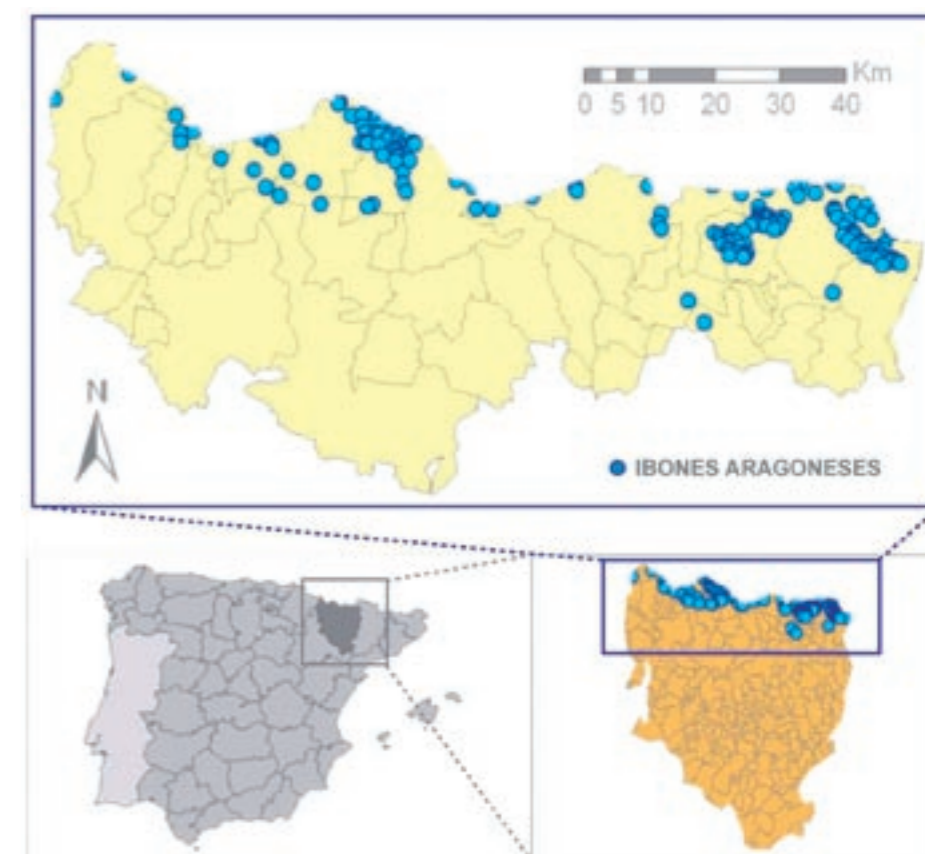
Formación de cubeta de sobreexcavación en zona de acumulación de hielo y mayor presión de éste sobre el sustrato.



El relieve montañoso antes, durante y después del retoque glaciar.

de su entorno que se depositan en su fondo, por lo que lentamente van perdiendo profundidad y extensión. El final del proceso supone su desaparición como masa de agua, que es sustituida por una turbera, zona semiencharcada en la que viven especies vegetales adaptadas a la elevada humedad del suelo. Todos los ibones están en este proceso de relleno que culmina con su colmatación, aunque en diferente grado de evolución, pues hay ibones de una gran profundidad (hasta 100 m en el caso de Cregüeña), otros muy someros (menos de un metro) y algunos ya convertidos

en turberas. En nuestros días, se consideran ibones en el Pirineo Aragonés 174 masas de agua, según el Inventario de Puntos de Agua de la Confederación Hidrográfica del Ebro, pero el estudio de Del Valle y Rodríguez (2004) añadió otros 23, lo que eleva su número a 197.



Distribución del conjunto de lagos de alta montaña del Pirineo Aragonés.

Ibones del Pirineo aragonés: lagos glaciares entre agrestes montañas

En la mayor parte de los casos están por encima de 1800 m, aunque algunos se localizan por debajo de esta cota, como el de Baños (Panticosa) y Estanés (Ansó). Con frecuencia aparecen próximos en grupos de dos, tres o cuatro (casos de los ibones de Anayet, Arriel, Barbarisa o La Larri). En territorio aragonés, las mayores concentraciones se dan en el Alto Gállego (valle de Tena), especialmente en la cabecera del río Caldarés y en las cabeceras del Cinqueta, Ésera y Noguera Ribagorzana.

PRINCIPALES ALTERACIONES

Los ibones están sometidos a diferentes alteraciones directas, entre las que podemos destacar:

Represamiento

Actualmente encontramos muchos ibones represados. El objetivo principal de estos represamientos es permitir o aumentar la producción

hidroeléctrica, aunque en algunos ibones se realizaron para facilitar su uso ganadero, tratándose, en estos casos, de elevaciones de nivel de pequeño tamaño que suelen mantener una lámina de agua bastante estable, aunque afectada por las fluctuaciones naturales.

Los represamientos son de distinta naturaleza, ya que algunos son estáticos y no producen variaciones significativas del nivel de agua, lo que permite una naturalización progresiva de

las orillas, mientras otros son de gran tamaño y se gestionan con el fin de optimizar la producción hidroeléctrica, lo que implica variaciones importantes de nivel que impiden que las orillas adquieran características de naturalidad (Del Valle y Rodríguez 2004).

“Ibones y otras morfologías glaciares son resultado del intenso retoque glaciar que sufrió buena parte de la cordillera pirenaica durante la última glaciación.”

Actividad ganadera en su entorno

La ganadería, principalmente vacuna, aprovecha los pastos de alta montaña y habitualmente acude a beber las aguas de los ibones. Por ello es muy frecuente que, en sus inmediaciones, permanezcan rebaños compuestos por un buen número de cabezas. Como consecuencia suelen abundar los excrementos en sus orillas o entorno inmediato, que por lavado superficial o subsuperficial acaban incrementando el nivel de nutrientes en las aguas, lo que puede desembocar en un proceso de eutrofia que desestabiliza la biota que habita en ellos (Rodríguez *et al.*, 2009).

Introducción de fauna íctica alóctona

La introducción de especies alóctonas en los lagos glaciares pirenaicos ha sido una práctica habitual. Ha estado destinada a aumentar su atractivo para la práctica de la pesca deportiva, pero supone una fuerte presión para los organismos autóctonos, ya que los peces introducidos suelen ser depredadores (Arruebo *et al.*, 2010). La presión generada puede llegar a la extinción de las especies nativas.

Actividades turísticas y deportivas

Los ibones y sus entornos, al constituir lugares de gran belleza paisajística, suelen ser objetivo de excursiones senderistas y montañeras, principalmente durante los meses de verano, aunque también en invierno son visitados por deportistas con el equipo necesario (esquí de travesía o raquetas). También, aunque en menor medida, sus aguas sirven para buceo en altitud o para buceo bajo hielo en el periodo en el que permanecen helados. Son actividades que, practicadas de manera adecuada, no suponen impactos destacables pero, si no se cumplen unas



Ibón inferior de Brazatos, represado para uso hidroeléctrico.

* Fotografía por Javier del Valle.

Ibones del Pirineo aragonés: lagos glaciares entre agrestes montañas

normas mínimas, pueden ir acompañadas de abandono de basuras o excesivo pisoteo de las orillas y de la vegetación natural, especialmente si se masifican (Rodríguez *et al.*, 2009).

Presencia de estaciones de esquí en las inmediaciones

Las instalaciones de estaciones y la presencia masiva de esquiadores significa una desnaturalización evidente de su entorno (en algunos casos del entorno inmediato, como en los ibones de Astún o Asnos) y una contaminación difusa, visual y sonora como consecuencia de la presencia de deportistas en invierno, visitantes en verano y las necesarias actividades de mantenimiento de las infraestructuras (Rodríguez *et al.*, 2009).

ESTADO DE CONSERVACIÓN ACTUAL

El estado actual de conservación de los ibones aragoneses es muy variado, pues encontramos algunos muy alterados y transformados por los distintos usos que, históricamente, se les ha dado, mientras otros permanecen en estado prácticamente natural, como láminas de agua en la alta montaña. Según su estado de conservación los podemos clasificar en:

Ibones muy alterados.

- a. Ibones recrecidos y convertidos en presas: en su salida natural se ha construido una presa, en algunos casos de tamaño considerable, para aumentar el volumen de agua almacenado y mejorar el resultado de su aprovechamiento hidroeléctrico. Las compuertas de la presa permiten regular la cantidad de agua reservada, por lo que su nivel presenta unas fluctuaciones importantes, que no dependen de la dinámica natural del ibón sino de la gestión que se haga del reservorio en función de los intereses de almacenamiento y producción ener-

gética. Estas fluctuaciones explican que sus orillas estén intensamente alteradas, apareciendo una banda sin vegetación que corresponde con el nivel máximo de llenado, denominada "carrera". Se trata de ibones que han perdido las características y dinámica natural de los lagos glaciares de alta montaña y han sido transformados en embalses.

En ocasiones, en su entorno aparecen restos de edificios, canteras, torres de funiculares para transporte de material, barracones para trabajadores, etc, correspondientes al periodo de su construcción.

Algunos ejemplos son los ibones de Ip, Respomuso, Escarra, Urdiceto, Brazatos inferior o Bachimaña Inferior y Superior.

- b. Ibones muy alterados por otras razones: podemos destacar los ibones de Baños y Asnos, aunque por razones diferentes.

El ibón de Baños se encuentra muy alterado debido a la urbanización de sus inmediaciones por el Balneario de Panticosa. Sus orillas están muy desnaturalizadas, convertidas, en gran parte, en muros y escolleras artificiales. También, sus aguas han recibido durante años restos de obra, escombros y vertidos directos de los desagües de los edificios de su entorno.

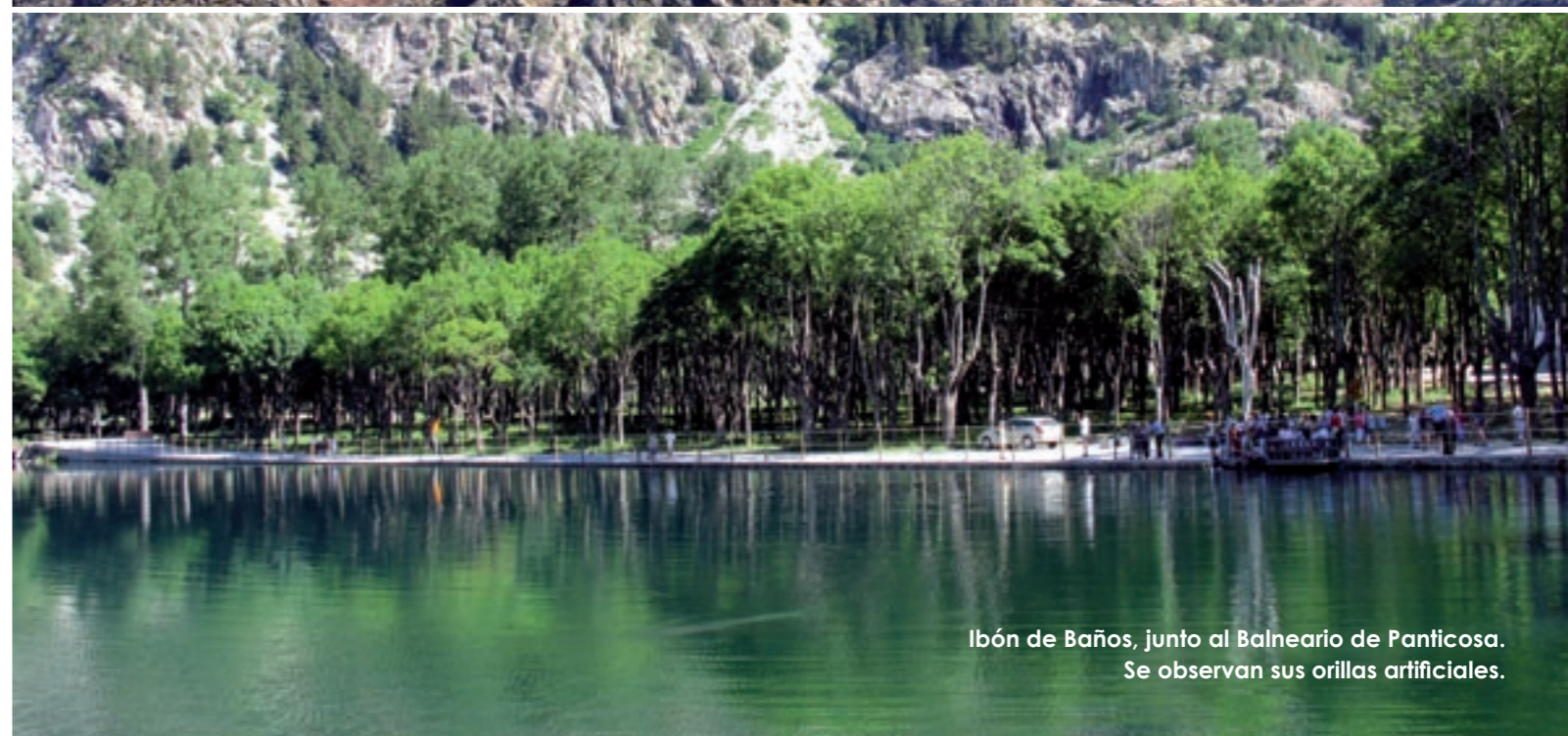
En las inmediaciones del ibón de Asnos se localizan las pistas de la estación de esquí Aramón - Panticosa. La estación toma las aguas del ibón mediante una tubería y un bombeo para la creación de nieve artificial, lo que altera su nivel y su comportamiento hidrodinámico.

Ibones algo alterados

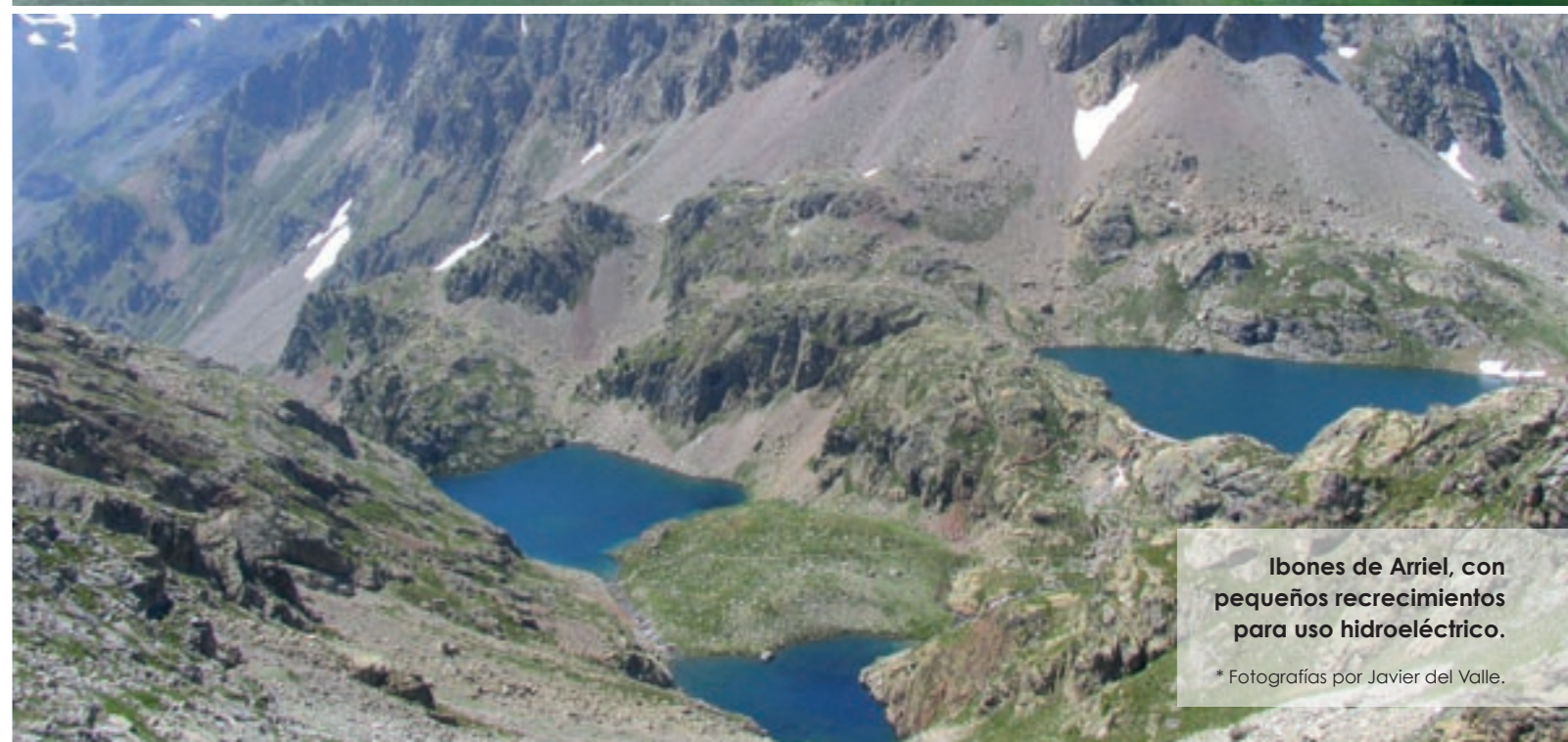
- a. Por recrecimiento: en su desagüe natural se ha construido un muro de pequeñas dimensiones, sin compuertas, para elevar el nivel del agua y mejorar su aprovechamiento



Ibón de Respomuso, con una presa de considerable tamaño para permitir el aprovechamiento hidroeléctrico.



Ibón de Baños, junto al Balneario de Panticosa. Se observan sus orillas artificiales.



Ibones de Arriel, con pequeños recrecimientos para uso hidroeléctrico.
* Fotografías por Javier del Valle.

Ibones del Pirineo aragonés: lagos glaciares entre agrestes montañas

hidroeléctrico o su uso ganadero. En ocasiones, este muro cuenta con algún tipo de control del desagüe que permite alterar el nivel del agua, pero las fluctuaciones son escasas, lo que facilita la naturalización de sus orillas y evita la formación de una charca muy visible. Son ibones con un comportamiento hidrodinámico mucho más similar al natural que en los de tipo a de los ibones muy alterados. Ejemplos puede ser los ibones de Arriel, para uso hidroeléctrico, o el de Piedrafita para utilización ganadera.

b. Por otras razones: incluimos aquí ibones que no están recrecidos ni alterados directamente, pero sí que lo está su entorno inmediato. Los ibones de Astún y Escalar son buenos ejemplos, pues su lámina de agua no está transformada, pero las instalaciones de la estación de esquí de Astún se localizan a muy pocos metros de ella.

El ibón de Campoplano es otro ejemplo en el que la lámina de agua no aparece alterada, pero en su entorno inmediato se construyó un dique de hormigón, destina-

do a su recrecimiento, en el que no se llegaron a instalar las compuertas, por lo que no existe afección al mismo ni alteración de su nivel de llenado.

También podemos incluir en este capítulo otros ibones que tienen una intensa presión ganadera, debido al aprovechamiento de sus pastos de verano por la cabaña vacuna. Son ibones en cuyo entorno pastan rebaños de vacas que beben sus aguas y aportan excrementos a ellas y al entorno inmediato, lo que se traduce en un aumento notable de la carga orgánica en sus aguas, que provoca una sobreadundancia de algas en sus fondos, a menudo evidente a simple vista. Un buen ejemplo de este hecho es el Ibonciecho, de pequeño tamaño, lo que facilita el proceso descrito.

Ibones escasamente alterados

No presentan alteraciones notables en sus aguas ni en su entorno inmediato, en muchas ocasiones por la dificultad de acceso. Suelen constituir lugares de gran belleza paisajística, lo que les convierte en destino habitual de montañeros y senderistas. Estas visitas, siempre que el comportamiento ambiental sea adecuado, no suponen impactos destacables, y el esfuerzo físico, que en muchas ocasiones exige llegar a ellos, significa una selección que evita la masificación. No obstante, podemos diferenciar dos tipos según la abundancia de visitantes, aunque el criterio de discriminación es subjetivo, basado en la accesibilidad, proximidad a rutas senderistas muy frecuentadas y experiencia personal del autor:

a. Ibones con destacado número de visitas: son ibones de acceso sencillo y no muy exigente físicamente o que están localizados en las proximidades de rutas senderistas de gran recorrido (GRs) o de pequeño recorrido (PRs), o bien en la ruta habitual de llegada a

cumbres frecuentadas. La belleza paisajística es un aliciente para llegar a ellos, especialmente en los meses de verano. Son muchos los ibones que podemos incluir en este apartado. Azul superior, Llena Cantal, Barbarisa, Basa de la Mora, Ballimorta, Anayet orientales, Tebarray, Paderna, Helado de Monte Perdido o Coronas.

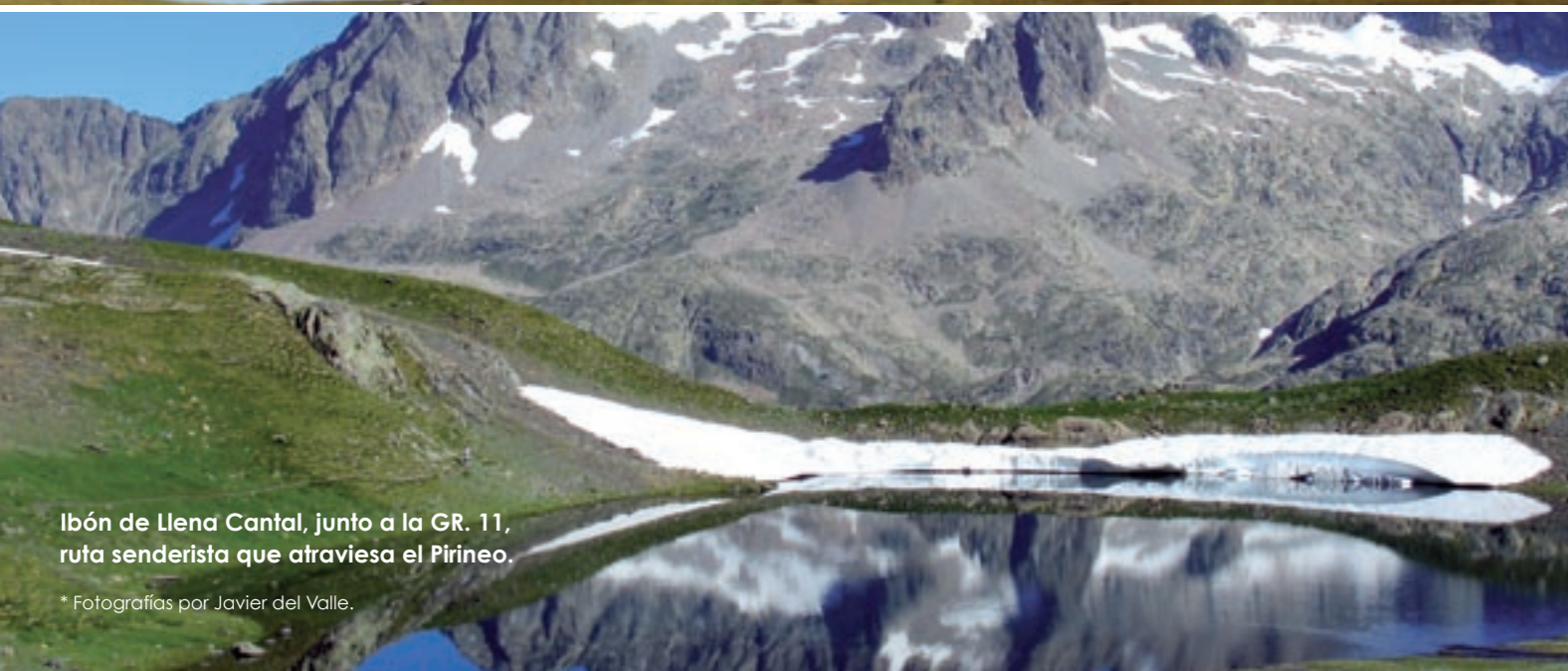
b. Ibones escasamente visitados: se localizan en lugares de difícil acceso o alejados de las principales rutas montañosas y senderistas, por lo que visitarlos exige que se conviertan en objetivo específico de actividades deportivas. Para llegar a ellos, en ocasiones hay que salvar importantes desniveles, lo que supone una clara selección para las visitas.

Podemos incluir en este apartado ibones como Lliterola, Catieras, Vallibierna, Anayet Occidentales, Ordicuso, Posets o Estany Negre. También hemos de mencionar aquí el caso de Cregüña, el mayor ibón en estado natural (sin recrecimiento alguno) de los Pirineos. Su extensión es de unas 34 ha y las batimetrías realizadas en él señalan que alcanza una profundidad de 96.9 m (Pintor et al., 2009). Se trata, sin duda, de un ibón único debido a sus características, una enorme extensión de agua azulada, a casi 2600 m de altitud al Suroeste del macizo de Aneto – Maladeta, que constituye un lugar enormemente atractivo en sí mismo, pero la dureza de la principal vía de acceso supone una fuerte limitación del número de visitas.

“En la última década se ha producido un cambio en la actitud social, en la percepción y relación con estos humedales, aumentando su conocimiento y valoración”



Ibón de Escalar, junto a la estación de esquí de Astún.



Ibón de Llena Cantal, junto a la GR. 11, ruta senderista que atraviesa el Pirineo.

* Fotografías por Javier del Valle.

Ibones del Pirineo aragonés: lagos glaciares entre agrestes montañas

INTERÉS CIENTÍFICO

Los ibones y sus entornos han ido despertando progresivamente el interés científico. Así, se han realizado estudios de reconstrucción de paleoambientes (Chueca *et al.*, 1998), estudios de flora acuática (Cirujano *et al.*, 1997) o sobre su estado de conservación (Del Valle y Rodríguez 2004; Rodríguez *et al.*, 2009, y otros).

No obstante, el interés por los ibones ha desbordado el mundo científico, extendiéndose por otros ámbitos sociales, por lo que se han desarrollado diversas acciones de instituciones, empresas o colectivos como a continuación desarrollaremos.

VALORACIÓN SOCIAL Y DEPORTIVA

Como hemos señalado, algunos ibones aragoneses han sido explotados históricamente como reservas de agua para la generación de hidroelectricidad, pesca deportiva o para el aprovisionamiento de agua para el ganado sin regulación de estas actividades.

La relación de la sociedad con estos lugares singulares de la alta montaña ha cambiado en la última década (Pardo *et al.*, 2010). Montañeros y senderistas, fotógrafos, amantes de la naturaleza e incluso buceadores se han aproximado a ellos con una mentalidad no productiva y una actitud de valoración de estos lugares,

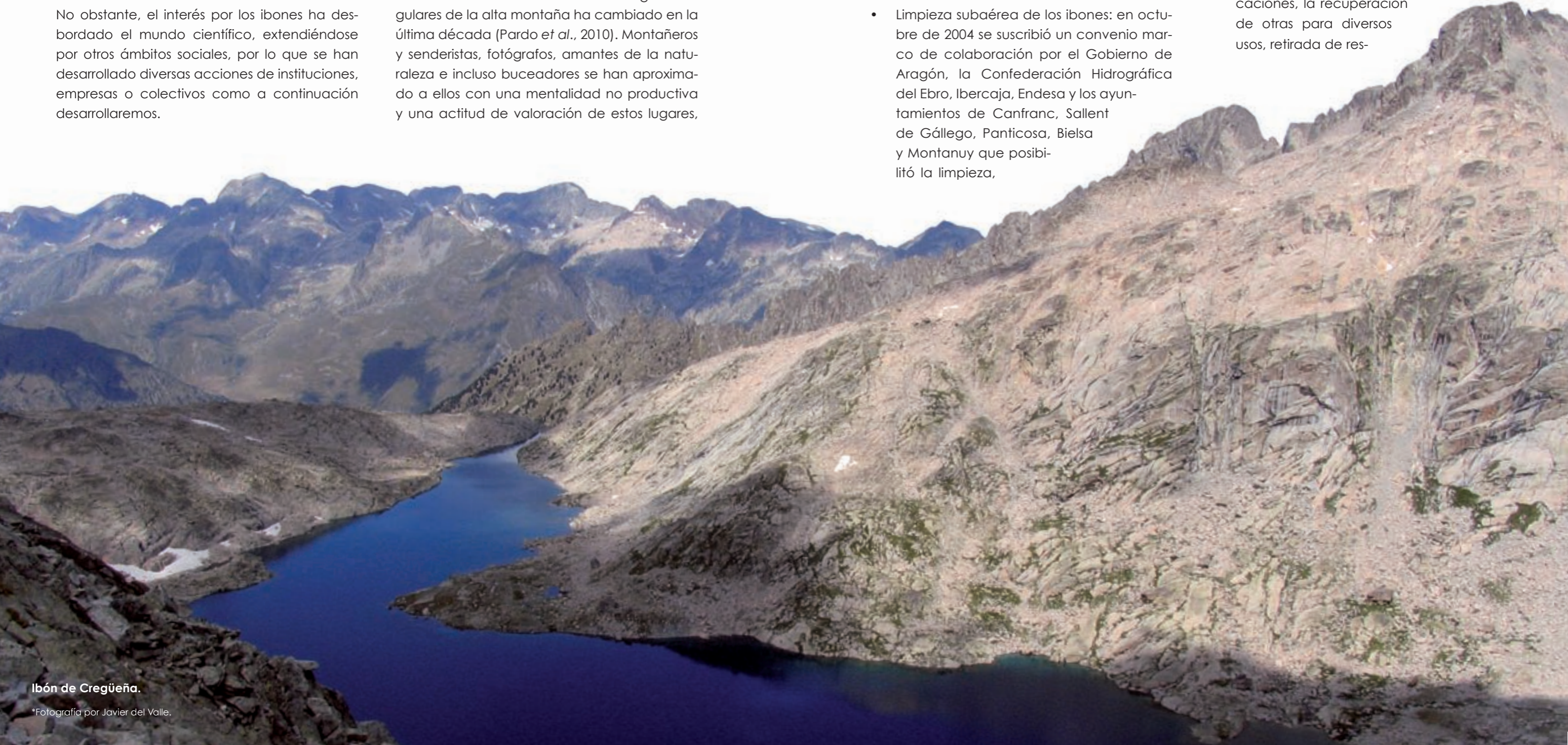
constatando, en algunos casos, su deterioro y profunda transformación y, en otros, su estado natural y la gran belleza de estos enclaves.

Esta nueva actitud, encuadrada en lo que podemos denominar “paradigma ambientalista” característico de finales del siglo XX y principios del XXI, se ha materializado en numerosas actividades, entre las que podemos destacar:

- Limpieza subaérea de los ibones: en octubre de 2004 se suscribió un convenio marco de colaboración por el Gobierno de Aragón, la Confederación Hidrográfica del Ebro, Ibercaja, Endesa y los ayuntamientos de Canfranc, Sallent de Gállego, Panticosa, Bielsa y Montanuy que permitió la limpieza,

regeneración medioambiental y acondicionamiento de ibones en el Pirineo aragonés.

Gracias a dicho convenio se realizó un análisis del estado de conservación y alteración del entorno de los ibones incluidos en el proyecto y se realizó un programa de integración paisajística que incluía la demolición de antiguas edificaciones, la recuperación de otras para diversos usos, retirada de res-



Ibones del Pirineo aragonés: lagos glaciares entre agrestes montañas



Toma de muestras mediante buceo en Marboré.

*Fotografía por Javier del Valle.

tos de obra y regeneración de antiguas escombreras. Se realizaron actuaciones en los ibones de Ip, Arriegl, Respomuso, Bachimaña, Azules, Brazato, Bramatuero, Marboré, Urdiceto, Campoplano y Llauset.

- La Federación Aragonesa de Actividades Subacuáticas (FARAS): ha desarrollado numerosas inmersiones en ibones, creando una especialidad en buceo bajo hielo reglada mediante un manual presentado en las *I Jornada de Buceo bajo hielo y traje seco* (Panticosa 2003). En dicha Jornada el Ibón de Baños fue designado *Ibón Escuela* para la formación de buceadores e instructores.

La FARAS ha elaborado un manual de buenas prácticas para buceadores en lagos de alta montaña basándose en los resultados obtenidos de la valoración de impactos ambientales más significativos identificados en el buceo (Rodríguez *et al.*, 2009). La Federación y el grupo de investigación GIMACÉS, han realizado dos limpiezas subacuáticas del ibón de Baños; la primera realizada en 2005 con la participación de casi 40 buceadores de diferentes clubes, y la segunda en octubre de 2006.

- El Club Inmersión y Montaña de Jaca ha realizado numerosas actividades de sensibilización ambiental en los ibones de la

Jacetania y Alto Gállego. Ha publicado dos guías de sensibilización ambiental en 2005 y en 2007. También son destacables las limpiezas que han realizado en los ibones de Anayet, Piedrafita y Catieras (veranos de 2006 y 2007) y en los de Bucuesa y Truchas (2008; Pardo *et al.*, 2010).

- En el marco de Expo Zaragoza2008 la Tribuna del Agua organizó una actividad paralela, la jornada "Montaña de piedra, Montaña de agua", celebrada en el Palacio de Congresos de Huesca con objeto de dar a conocer y poner el valor el patrimonio natural de los ibones aragoneses.
- La Fundación Boreas ha continuado la labor investigadora iniciada por GIMACÉS con estudios medioambientales de los ibones de Baños, Sabocos, Truchas, Escalar, Astún y Marboré, participando varios de sus miembros en el curso monográfico "Los Ibones Aragoneses", impartido por la Universidad de la Experiencia (Unizar) en las subseces de Jaca (2010) y Sabiñánigo (2011).
- Elaboración del vídeo "Montañas de agua", realizado por investigadores de la Universidad de Zaragoza y la Fundación Boreas, y financiado por la FECYT.

CONCLUSIONES

Los ibones pirenaicos son elementos de nuestro patrimonio natural con un gran interés científico, histórico y socioeconómico. Son unos ecosistemas singulares estrechamente relacionados con la dinámica glaciar del Pleistoceno y su intensa incidencia en los Pirineos. Acumula información paleoclimática y paleoambiental de gran valor.

Los usos que el ser humano ha realizado de ellos ha producido afecciones a los lagos y sus

BIBLIOGRAFÍA

- Arruebo T., Santolaria Z., Pardo A., del Valle J., Urieta J., Lanaja J. y Rodríguez C. (2010). Valoración del estado de conservación de los lagos de alta montaña del Pirineo Aragonés: diagnóstico de la situación actual, análisis comparativo y propuesta de medidas de gestión. *Actas del Congreso Nacional de medio ambiente "CONAMA 10"*.
<http://www.conama10.es/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=90&id=431&op=view>
- Chueca J., Peña J. L., Lampre F. y Julián A., (1998). La Pequeña Edad de Hielo en el Pirineo central meridional: influencias paleoambientales a partir de datos geomorfológicos, In Gómez Ortiz, A. y Pérez Alberti, A., 1998. *Las huellas glaciares de las montañas españolas*, Universidad de Santiago de Compostela, pp: 193-261.
- Cirujano S., Medina L., Aragonés A. y García, P. (1997). Flora acuática de las lagunas y humedales de alta montaña española, Jornadas sobre la conservación de lagos y humedales de alta montaña de la Península Ibérica, Libro de resúmenes, nº 34.
- Del Valle J. y Rodríguez C. (2004). Análisis de la calidad ambiental y paisajística del entorno de los ibones del Pirineo aragonés. *Actas del VII Congreso Nacional de Medio Ambiente*. Madrid.
http://www.conama.org/cvii/default.asp?pag=documentos&npag=ls_documentos&tipo=autor&autor=del%20valle
- Ehlers J., and P.L. Gibbard, (ed.) (2004). *Quaternary Glaciations: Extent and Chronology 1: Europe*. Elsevier, Ámsterdam, 488 pp.
- Pardo A., Rodríguez C., Arruebo T., del Valle J. (2010). Acciones de protección y sensibilización medioambiental en los ibones del Pirineo Aragonés en la década 1999 – 2010: descripción, análisis y consecuencias. *Actas del Congreso Nacional de medio ambiente "CONAMA 10"*
<http://www.conama10.es/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=90&id=45&op=view>

Ibones del Pirineo aragonés: lagos glaciares entre agrestes montañas

entornos de distinta intensidad. En la última década se ha producido un cambio en la actitud social, en la percepción y relación con estos humedales, aumentando su conocimiento y valoración como lugares bellos para la admiración y para la práctica de ciertos deportes.

Esta nueva situación les confiere un enorme potencial para su uso como recurso educativo y de sensibilización ambiental.

AGRADECIMIENTO

Este artículo forma parte de las actividades de difusión incluidas dentro del proyecto "Valoración del estado de conservación que presentan dos ibones situados en el Pirineo oscense, Baños y Sabocos: diagnóstico, análisis comparativo y propuesta de alternativas para su gestión", financiado por el Instituto de Estudios Altoaragoneses. Agradecemos el apoyo prestado por la Unidad de Cultura Científica de la Universidad de Zaragoza.

“Los ibones pirenaicos son elementos de nuestro patrimonio natural con un gran interés científico, histórico y socioeconómico. Acumulan información paleoclimática y paleoambiental de gran valor.”

Javier Del Valle (a), Tomás Arruebo (b), Alfonso Pardo (c), José Matesanz (d), Carlos Rodríguez (e), Zoe Santolaria (f), Javier Lanaja (g) y José Urieta (f).

- a. Ingeniería del Medio Ambiente, Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza.
- b. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza.
- c. Dpto. de Agricultura y Economía Agraria, Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza.
- d. Dpto. de Ingeniería Química y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza.
- e. Dpto. de Didáctica de las Ciencias Experimentales, Facultad de Educación, Universidad de Zaragoza.
- f. Grupo de Termodinámica Aplicada y Superficies, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza.
- g. Laboratorio de Calidad de Aguas y Medio Ambiente, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, Universidad de Zaragoza.

- Pascual Martínez M.L., Rodríguez-Alarcón A., Hidalgo Zamora J., Borja F., Díaz del Olmo F. y Montes del Olmo C., (2000). Distribución y caracterización morfológica y morfométrica de los lagos y lagunas de alta montaña de la España peninsular, In Granados Martínez, I. y Toro Velasco, M., 2000. *Conservación de los Lagos y Humedales de Alta Montaña de la Península Ibérica*, UAM Ediciones, Madrid, pp: 51-77.
- Pintor C., Losada J.A., Casanovas R. (2009). Batimetrías de lagos aragoneses. *Naturaleza Aragonesa* Nº 22.
- Pirineo Digital, (2006). El Gobierno de Aragón y ENDESA dan por finalizada la primera fase de la limpieza de los ibones pirenaicos. Accesible: <http://www.pirineodigital.com/noticias/2006/10/16/limpieza-ibones-gobiernoaragon.html>. Acceso: 30/03/2011.
- Rodríguez C., Arruebo T. y Pardo A. (2009). Modelo de gestión para espacios naturales de alto interés ecológico: lagos de alta montaña (ibones). Publicaciones del Consejo de protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, 282 p.
- Tesis doctorales de Tomás Arruebo y Zoé Santolaria. También podemos señalar los trabajos del Grupo de Investigación del Medio Ambiente (GIMACES) del Centro de Estudios Superiores de Fundación San Valero en colaboración con Fundación Boreas, o los proyectos de investigación de Blas Valero sobre sedimentos acumulados en sus fondos.
- Vídeo "Montañas de Agua" disponible en: <http://zco1999.wordpress.com/2011/01/12/el-documental-montanas-de-agua-en-la-red>.



LEER EL PERIÓDICO CON OJOS MATEMÁTICOS

POR RAÚL IBÁÑEZ

El lector de este artículo estará de acuerdo conmigo en el hecho de que no hace falta haber cursado estudios de matemáticas para poder leer el periódico, escuchar la radio, ver la televisión o navegar por internet. De hecho, quizás piense que las matemáticas no son necesarias en estas acciones cotidianas y es, precisamente, en esto en lo que estaremos en desacuerdo.

Por una parte, los medios de comunicación utilizan herramientas matemáticas (estadísticas, probabilidades, mediciones, proporciones, mapas, gráficos, datos numéricos, cálculos aritméticos, etc), tanto en el contenido informativo como en el cultural y social, e incluso en la parte publicitaria. Por este motivo, se hace necesario el conocimiento de unas matemáticas básicas para comprender la información que nos es suministrada a través de los medios de comunicación, y no actuar como simples receptores de la misma. Conocimientos que son los que se adquieren durante la etapa de la educación obligatoria en nuestra formación. Asimismo, el

periodista deberá conocer bien las herramientas, en particular, las de tipo matemático, que utiliza en su trabajo.

Por otra parte, los dos pilares sobre los que se debe apoyar la educación obligatoria, en mi opinión, son el lenguaje y las matemáticas. Estas últimas son necesarias no solamente para aprender los conocimientos básicos de dicha materia (geometría elemental, análisis matemático, aritmética, probabilidad, estadística, etc), sino porque el aprendizaje de las matemáticas estimula y potencia el pensamiento, desarrolla la lógica, enseña a analizar y resolver problemas (no solo los ejercicios matemáticos del aula, sino los problemas que nos podemos

encontrar en nuestra vida cotidiana, o en nuestro trabajo), anima a las personas a ser activos a la hora de enfrentarse a los problemas, ofrece herramientas para resolverlos (estimación de cantidades, creación de modelos, etc) y estimula el sentido crítico.

“Se hace necesario el conocimiento de unas matemáticas básicas para comprender la información que nos es suministrada a través de los medios de comunicación, y no actuar como simples receptores de la misma.”

*<http://blog.us.cision.com>

A lo largo de algunos sencillos ejemplos, mostraremos que hay que mantenerse crítico y matemáticamente activo a la hora de leer un periódico, escuchar la radio, ver la televisión o bucear en internet.

NACIONAL

La escopeta nacional.

Uno de los aspectos en los que podemos ser críticos al leer o escuchar una noticia, es si los datos numéricos que se proporcionan en la misma son razonables, independientemente de que sean ciertos o no. En ocasiones, un simple vistazo será suficiente (vease la noticia de la gitana M^a Luisa), en otras tendremos que realizar una estimación más en profundidad (como en la noticia del sorteo de la final de la Copa o en las noticias sobre manifestaciones²⁻³), mientras que habrá algunas en las que bastará una sencilla operación aritmética. Así, en un artículo sobre la caza en España, aparecido en el diario El Mundo en 2011, se pudo leer que “Se calcula que en España hay un millón de cazadores que cada temporada realizan 250.000 millones de disparos”. ¿Es esto posible? Con una pequeña división obtenemos que eso significaría que de media cada cazador dispara 250.000 tiros al año. Si los cazadores saliesen a cazar todos los días del año, cosa bastante improbable, apretarían el gatillo unas 685 veces al día en promedio. Pero intentemos ser un poco más realistas y supongamos que de media cada cazador sale a cazar 100 días al año, uno de cada cuatro, que sigue siendo una estimación muy por encima de la realidad. Entonces, los datos anteriores nos revelan que, en ese caso, cada cazador realizaría alrededor de 2.500 disparos cada día que sale a cazar. Sin conocer mucho del mundo de la caza, parece que los datos suministrados por la noticia son claramente erróneos.

La media aritmética.

En septiembre de 2009, inmersos en la terrible crisis que estamos padeciendo y con el gobierno intentando tomar algunas medidas para combatirla, se pudo leer en el periódico ABC (aunque yo tuve conocimiento de ella a través de la magnífica página web malaprensa.com) una noticia al respecto, que nos volvía a poner de manifiesto la utilidad de la media aritmética, como resumen de una información más compleja, pero también sus peligros. El titular de la noticia, que era portada del periódico, decía: “Las familias mileuristas dedicarán casi un sueldo a pagar la subida fiscal”, y continuaba la noticia: “El aumento de impuestos, aprobado el sábado, costará 800 euros anuales por unidad familiar”.

Esto nos recuerda el chiste que dice “Si una persona se come un pollo y otra ninguno, de media se han comido medio pollo cada uno”, es decir, una cosa es que “de media” cada uno se coma medio pollo y, otra muy distinta que, realmente, cada uno coma medio pollo, sino que se lo cuenten al segundo. Lo mismo ocurre en la noticia. Los 800 euros que se mencionaban eran la media por unidad familiar que iba a costar la subida fiscal, y no lo que realmente tenía que pagar cada familia. Según los cálculos que aportaba el Ejecutivo, la subida fiscal que habían aprobado ascendía, en total, a 11.650 millones de euros. Ante esta información nos podemos plantear, y así lo hacía también este medio de comunicación, alguna forma de intentar entender el significado de esta cantidad, y una posible solución era realizar una estimación de la media de la subida fiscal por unidad familiar (en términos coloquiales, lo que cada familia tendría que pagar si la subida fiscal se pagara “a escote” entre todas las familias), aunque es una información simplemente orientativa, puesto que la subida fiscal no solamente afecta a personas, sino también a empresas.

Así, si en España hay censadas algo más de 14 millones de familias, según el Instituto Nacional de Estadística, de media cada hogar tendría que pagar, unos 800 euros. Eso no implicaba que "cada hogar tendrá que hacer frente a una subida de impuestos de unos 800 euros", como decía la noticia.

Cuidado con las estadísticas.

En un especial de la revista "Tráfico y Seguridad Vial" que edita la Dirección General de Tráfico, dedicado a la Semana Santa del 2009, pudo leerse la siguiente información con datos de la Semana Santa del año 2008: "Las peores horas: de 14 a 20 horas se produce el mayor porcentaje de muertes por accidentes (25%), según las estadísticas, y de mayores retenciones, seguido del periodo de 7 a 14 horas (20%). Por tanto, esas son las horas a evitar."

Sin entrar en análisis profundos, se me ocurren tres comentarios breves: i) nos aconsejan que evitemos las siguientes horas para nuestros desplazamientos en coche, de 7 a 20 h., es decir, todas las horas del día, lo que significa que nos aconsejan que viajemos de noche, que por cuestiones como la visibilidad o la somnolencia de los conductores no parece ser un consejo muy lógico; ii) si a esas horas se producen más accidentes, quizás sea también porque son las horas en las que viajan la mayoría de los conductores, lo lógico habría sido hacer un desglose más fino de las franjas horarias del día para animar a los conductores a que se intenten distribuir de forma uniforme y no concentrarse en las mismas horas; iii) por último da la impresión de que las estadísticas están mal calculadas, o que están mezcladas distintas estadísticas, puesto que las horas más conflictivas, según la revista, son de 7 a 20, que son más de la mitad del día, pero resulta que el porcentaje de accidentes es menos del 50%, exactamente el 45% de los accidentes.

INTERNACIONAL

El terremoto de Fukushima.

Los científicos, o cualesquiera otros expertos de nuestra sociedad, debemos de estar preparados, cuando se producen cierto tipo de noticias relacionadas con nuestra área de conocimiento, para explicar a la sociedad los temas relacionados con las mismas. Un ejemplo reciente podría ser el terremoto de Fukushima, o el más cercano de Lorca. Algunos científicos acudimos a los medios de comunicación para explicar la escala de Richter (aunque de hecho la escala que utilizan los sismólogos ya no es ésta sino una variación suya), que sirve para medir la magnitud del terremoto y es una escala logarítmica. ¿Qué quiere decir esto? Quiere decir que un aumento de una unidad en la escala de Richter corresponde no a un aumento lineal sino a un aumento por un "factor 10" en la magnitud del temblor. Un temblor de magnitud 8 sacude el suelo 10 veces más fuerte que un terremoto de magnitud 7, y 100 veces más fuerte que uno de magnitud 6. Y más aún, un temblor de magnitud 9 (como el de Fukushima) es 10.000 veces más potente que uno de magnitud 5 (como el de Lorca).

En relación a la purificación del agua (afectada por la radioactividad) pudimos leer en El Correo la siguiente explicación de dos técnicos japoneses: "En una hora, cada tanque purifica 200 toneladas de agua, que es lo que consume al día una familia de cuatro personas". Como tenía la sensación de que la cantidad era exagerada, me metí en internet para buscar información relacionada. Y según los datos que encontré, en un informe de Greenpeace,

el consumo de agua en EEUU (el país que más gasta) es de 500 litros por habitante y día, mientras que en España está entre 250 y 300 litros por habitante y día (aunque esto es el consumo global de agua, puesto que el consumo medio en los hogares españoles, por habitante y día, según el INE, es del orden de 160 litros), lo que implicaría que el consumo de agua por familia –de cuatro personas– es como mucho, tomando como referencia los datos anteriores de EEUU, de 2.000 litros, es decir, 2 toneladas.

ECONOMÍA

Mayorías.

En marzo de 2010, mientras se debatía en los medios de comunicación sobre la sostenibilidad del actual sistema de pensiones y la conveniencia o no de planes de pensiones privados, pudimos

leer en el periódico ABC el titular: "La mayoría de los ministros sigue el consejo de Corbacho y tiene planes de pensiones privados". La noticia, en cuestión, estaba acompañada de una fotografía del Presidente de Gobierno, Zapatero, y todos sus ministros, en la que se marcaba con una "hucha de cerdito" roja a quienes sí disponían de planes de pensiones privados y blanca a quienes no los habían contratado. Mientras que se marcaba con una interrogación a los miembros del gobierno de los que no se tenía información. En resumen, estos eran los datos, 5 huchas de cerdito rojas (luego con planes de pensiones privados), 4 huchas blancas (no tenían) y 9 interrogantes (no se sabía). Lo que nos lleva a la conclusión de que 5 de 18 es la "mayoría de los ministros", según el periódico. Pues a mí no me parece una mayoría muy grande, de hecho ni siquiera me parece una mayoría. Una foto enorme de los miembros del gobierno,



acompañada del patrimonio de cada ministro, gráficos y una hoja entera para la noticia, todo ello construido sobre humo.

DEPORTE

Porcentajes, fuente de problemas.

Con motivo del inicio de la temporada 2006/07 de la Liga de Fútbol, pudimos leer el siguiente titular en El Correo: "PSE y PP critican la subvención foral al Athletic «porque hay otras prioridades»", que seguía: "El club se embolsará dos millones de euros esta temporada por ceder su imagen para promocionar Vizcaya". Juntos los dos temas que más superficie ocupan en los periódicos, fútbol y política.

Luego, en el cuerpo de la noticia se podía leer... "Estos dos millones, además, suponen un incremento del 25 % con respecto al anterior pacto entre ambas entidades -1,5 millones de euros cada curso durante cuatro ejercicios-". Si se ha pasado de 1,5 millones de euros a 2 millones de euros, entonces el incremento ha sido de 0,5

millones de euros (medio millón), por lo tanto el incremento es del 33%, ya que es incremento respecto a la ayuda pactada anteriormente. Lo que sí se podía haber dicho es que el pacto anterior era un 25 % menor que el presente, eso sí es correcto.

El apasionante mundo de los sorteos.

La clasificación, para la final de un equipo de fútbol desató una euforia desmedida en su afición, deseosa de asistir a una final. Con ese motivo, el Club realizó un sorteo de entradas para la final entre sus socios, en el que me vi implicado sin ser yo una persona muy aficionada al fútbol.

Al día siguiente del sorteo, un periodista que cubría su desarrollo se puso en contacto conmigo para que analizáramos las cifras del mismo. El club sorteaba 14.800 entradas y 33.301 socios se inscribieron, a través de 25.746 solicitudes (ya que cada solicitud podía llevar agrupados hasta cuatro socios, con lo cual si salía elegido su número de solicitud les corresponderían tantas entradas como socios agrupados), es decir, había $33.301 - 25.746 = 7.555$ socios agrupados como segundo, tercero o cuarto socio de alguna de las solicitudes.

La siguiente información, que me proporcionó el periodista, es que el club había informado el segundo día de plazo para la inscripción que ya se habían apuntado 19.654 socios en un total de 13.449 solicitudes, es decir, ya había 6.205 agrupados extra. La primera conclusión fue que entre los números de las solicitudes 13.450 y 25.746 solamente podía haber $7.555 - 6.205 = 1.350$ socios extra agrupados. Y con este dato es con el que empezamos a darnos cuenta de que las cuentas no cuadraban.

En el sorteo se sacaban 5 números y se entregaban 2.960 entradas (1/5 del total a repartir) a partir de cada uno de ellos, tenien-

do además en cuenta que había solicitudes con socios agrupados. Entonces nos percatamos de que las cuentas no cuadraban y así lo reflejó el periodista en el artículo publicado al día siguiente: "Las entradas repartidas entre el número 18.428 y el 19.956 (ambos inclusive) son, según las bases del sorteo, 2.960. Como quiera que ahí solo aparecen 1.529 números de agraciados resulta que en teoría hay 1.431 agrupadas en esta horquilla. Aquí aparece el primer problema matemático. Son 81 más de las en teoría 1.350 asignadas para todos los números situados por encima del registro 13.449. Entre los números 20.299 y el 24.903, ambos inclusive, hay un total de 4.605 solicitudes para 8.880 entradas, dado que al haberse superpuesto tres números agraciados (20.299, 21.549 y 22.496) a este grupo le corresponden el triple. La resta entre el número disponible y la cifra de solicitudes afortunadas revela que aquí se han agrupado 4.275 personas. Si sumamos esta cifra a los agrupados entre el 18.428 y el 19.956 resulta que los socios 'concentrados' desde el segundo día son 5.706, cuando según datos oficiales del club en ningún caso podía ser mayor de 1.350."

Según nuestras estimaciones quedaba sin aclarar el paradero de unas 4.356 entradas. Al día siguiente el club dio a conocer que se había producido un error informático en la asignación de entradas.

Así mismo, el método de realización del sorteo también tenía su propio interés matemático. El sorteo no era un sorteo de los llamados "justo", puesto que no todas las solicitudes, todos los números, tenían las mismas probabilidades de

salir elegidos. Como había 25.746 solicitudes, el club decidió poner 5 urnas. La primera (para las decenas de mil) con 3 bolas -0,1,2-, y las demás con 10 bolas -del 0 al 9- (unidades de mil, centenas, decenas y unidades), aunque con correcciones durante el sorteo, ya que si por ejemplo la primera bola era un 2, la segunda bola solo podía tomar valores entre 0 y 5 (el número más alto era el 25.746).

El club no se dio cuenta, a la hora de elegir el método de sorteo, de que con el que se había propuesto, los números que empezaban por 2 tenían más posibilidades de salir que los que empezaban por 0 o 1. Para entenderlo mejor, simplifiquemos un poco y supongamos que tenemos que sacar un número premiado con ese método sobre un total de 20.001 solicitudes. Fijémonos en dos números, A = 13.437 y B = 20.001, ¿tendrán las mismas probabilidades de salir?. Para empezar en la primera urna, cada número -0,1,2- tiene las mismas probabilidades de salir (de hecho, 1/3). Si la primera bola es 1, entonces la probabilidad de que salga el número A es de 1 entre 10.000, ya que hay 10.000 números que empiezan por 1 -desde el 10.000 al 19.999-, pero si sale 2 en la primera urna, B tiene una probabilidad del 50% -1 entre 2- de salir, puesto que solamente hay dos números que empiezan por 2 -20.000 y 20.001-.

SOCIEDAD

Números grandes

En Mayo de 2009 pudimos leer en 20 Minutos la noticia "Ma. Luisa, la primera gitana que se hace oír en la Unión Europea. Reclama su pensión de viudedad, que España no le reconoce

1. Divulgamat, www.divulgamat.net (Real Sociedad Matemática Española)
2. R. Ibáñez, Un paseo por los medios de comunicación de la mano de unas sencillas matemáticas, Revista SIGMA, n. 32, 203-222, 2008.
3. Malaprensa, www.malaprensa.com (por Josu Mezo)
4. Matemáticas en tu mundo, catedu.es/matematicas_mundo (por José María Sorando)

por estar casada por el rito gitano y no por el civil". En el cuerpo de la noticia se comenta que de ser aceptada su reclamación, esto "podría sentar jurisprudencia para los 14.000 millones de gitanos".

Al leer la noticia hay algo que seguramente llama nuestra atención y es el número de gitanos que se menciona. La verdad es que al igual que la mayoría de las personas que leyeron la noticia no sabía cuál era la población gitana, en España, Europa o el mundo. Estaba claro que la cifra de 14.000 millones de gitanos era un poco exagerada,... sobre todo teniendo en cuenta que la población mundial es de unos 6.800 millones de personas.

Pero ¿cuál es la población gitana? En la wikipedia leí que "La población mundial de romaníes y su localización geográfica se desconoce con exactitud. La cifra más aceptada, procedente de datos agregados por países podría rondar los 12 millones de personas, de los cuales 10 se concentran en Europa." Lo que me hizo pensar que era posible que quien escribió el artículo seguramente tuviese en mente –de alguna otra fuente de información- la cifra de 14 millones de gitanos y simplemente fue un error al trasladar la información al artículo.

CIENCIA

Cultura científica.

En mayo de 2009 pudimos leer la siguiente noticia en la edición digital de El País (ELPAIS.com), aunque no ha sido el único ejemplo que se ha podido leer de este mismo error, "Google identificará a sus empleados descontentos con un logaritmo". Y continuaba "El grupo Google, consciente de que una fuga de cerebros pondría en duda su competitividad a largo plazo, ha establecido un modelo para identificar cuáles de sus 20.000 empleados es-

tán descontentos y que, como no podía ser de otra manera, basa la evaluación del grado de satisfacción y las expectativas de promoción en un logaritmo". Aunque al final de la noticia estaba escrito que "El algoritmo de Google ayudará a la compañía...".

No vamos a especular sobre el origen del error, aunque sí comentaremos que el lector de esta noticia sí debería saber que la palabra "logaritmo" estaba fuera de lugar. Podemos acudir a la enciclopedia de internet, wikipedia, y ver qué nos dicen estos dos términos.

Logaritmo: En matemática, el **logaritmo** es una función matemática inversa de la función exponencial. Logaritmo de un número (x) es el exponente (n) al que hay que elevar la base dada (b), para que nos de dicho número (x). Es decir, $\log_b x = n$, si $x = b^n$. Así, en la expresión $10^2 = 100$, el logaritmo de 100 en base 10 es 2, y se escribe como $\log_{10} 100 = 2$.

Algoritmo: En matemáticas, ciencias de la computación y disciplinas relacionadas, un **algoritmo** (...) es una lista bien definida, ordenada y finita de operaciones que permite hallar la solución a un problema. Dado un estado inicial y una entrada, a través de pasos sucesivos y bien definidos se llega a un estado final, obteniendo una solución.

EL TIEMPO

Otra confusión con los porcentajes y la probabilidad es la supuesta propiedad aditiva, que de hecho no se satisface. Un ejemplo habitual que nos gusta utilizar a quienes nos dedicamos a la divulgación de las matemáticas, es el de aquel hombre, o mujer, del tiempo que comentó que la probabilidad de que lloviese el sábado era del 50% y que también era del 50% la probabilidad de que lloviese el domingo. Por supuesto, en este ejemplo se está considerando (aunque la realidad es más compleja), que los dos

sucesos –que llueva el sábado y que llueva el domingo- son independientes el uno del otro, y que ambos tienen una probabilidad del 50%.

Seguido, el hombre, o la mujer, del tiempo concluye que por lo tanto la probabilidad de que lloviese el fin semana era del 100%, es decir, llovería seguro. Puestos a sumar probabilidades, alguien más optimista pensaría que como la probabilidad de que no lloviera el sábado era del 50%, y de que no lloviera el domingo era del 50%, entonces la probabilidad de que no lloviera el fin de semana era del 100%. No llovería seguro.

Si se piensa detenidamente, la probabilidad real de que lloviese el fin de semana (es decir, el sábado o el domingo) era del 75 % y no del 100%. Y la probabilidad de que no lo hiciera del 25%.

En Malaprensa³ pudimos leer una noticia de 2006 de un periódico de Salamanca, Tribuna, con un error de este tipo: "Las universidades pierden más de un 11% del alumnado". En el cuerpo de la noticia: "Las universidades de Salamanca –la pública y la Pontificia- han perdido entre las dos un 11,34 por ciento del alumnado en el curso académico 2005-06 con respecto al año anterior. La Universidad de Salamanca reúne a 26.582 alumnos frente a los 27.886 del periodo anterior (-4,68 por ciento) mientras que la Pontificia de Salamanca concentra 6.516 alumnos, un 6,66 por ciento menos que en 2004-05 cuando matriculó a 7.158 alumnos". El descenso real es del 5,55% (es decir, 33.098 alumnos frente a los 35.044 del curso anterior) y no del 11,34%, ya que no se suman los porcentajes.

Raúl Ibáñez

Facultad de Ciencia y Tecnología
Universidad del País Vasco



AMS-02: LA ODISEA DE UN DETECTOR DE RAYOS CÓSMICOS

El 16 de mayo de 2011, a las 8:56 a.m. (EDT), despegó desde el Kennedy Space Center (KSC, Cabo Cañaveral, Florida), rumbo a la Estación Espacial Internacional (ISS), la misión espacial STS-134. Esta misión ha sido la última realizada por el trasbordador Endeavour de la NASA (National Aeronautics Space Administration), a bordo del cual ha viajado el instrumento AMS-02 (Espectrómetro Magnético Alpha). El acoplamiento del trasbordador a la Estación Espacial se produjo el día 18 de mayo a las 6:15 a.m. A las 2:30 a.m. del día 19 de mayo se completaba la operación de trasvase del instrumento AMS-02 a su posición definitiva en el eje S3 de la ISS, donde permanecerá hasta la desorbitación de ésta en el año 2028, e iniciaba sin incidencias su operación y recogida de datos científicos. La misión STS-134 concluía felizmente el 1 de junio a las 2:34 a.m. con el aterrizaje del Endeavour en la pista del KSC.

POR MANUEL AGUILAR

Lanzamiento de Endeavour en
la Misión STS-134.

*<http://theatlantic.com>

AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

Es innegable que casi todo lo que conocemos acerca del Universo se basa en la observación y estudio de la componente electromagnética neutra de la radiación cósmica, procedente del espacio exterior. El descubrimiento de la radiación cósmica de microondas y sus anisotropías, los púlsares, las fuentes emisoras de rayos X, son solamente algunos ejemplos. Gracias a las medidas relacionadas con las anisotropías del fondo cósmico de microondas, las luminosidades de las supernovas SN1a lejanas y la morfología de cúmulos galácticos, se tiene una idea bastante precisa de la composición actual en materia-energía del Universo y, también, de cómo era en el momento del desacople de fotones ocurrido cuando el Universo tenía aproximadamente 370.000 años de existencia.

Estas medidas han puesto de manifiesto, entre otras cosas, que solo aproximadamente el 5% del total de la materia-energía del Universo está formado por los átomos conocidos. El resto está formado por un tipo de materia y de energía cuya naturaleza no es conocida. Este nuevo tipo de materia representa aproximadamente un 25 % del total, no emite ni absorbe radiación electromagnética y se ha detectado únicamente a través de efectos gravitacionales. De ahí que se denomine "materia oscura". El nuevo tipo de energía, denominada "energía oscura", representa aproximadamente el 70% del total, es de tipo repulsivo y es el agente propuesto para explicar la expansión acelerada del Universo. El descubrimiento de la energía oscura, a finales de la década de los 90, fue considerado por la revista Science el hito científico más sobresaliente del año 1998. La validación del Modelo Cosmológico Estándar, que cuantifica las fracciones de materia y energía que conforman el Universo, fue consi-

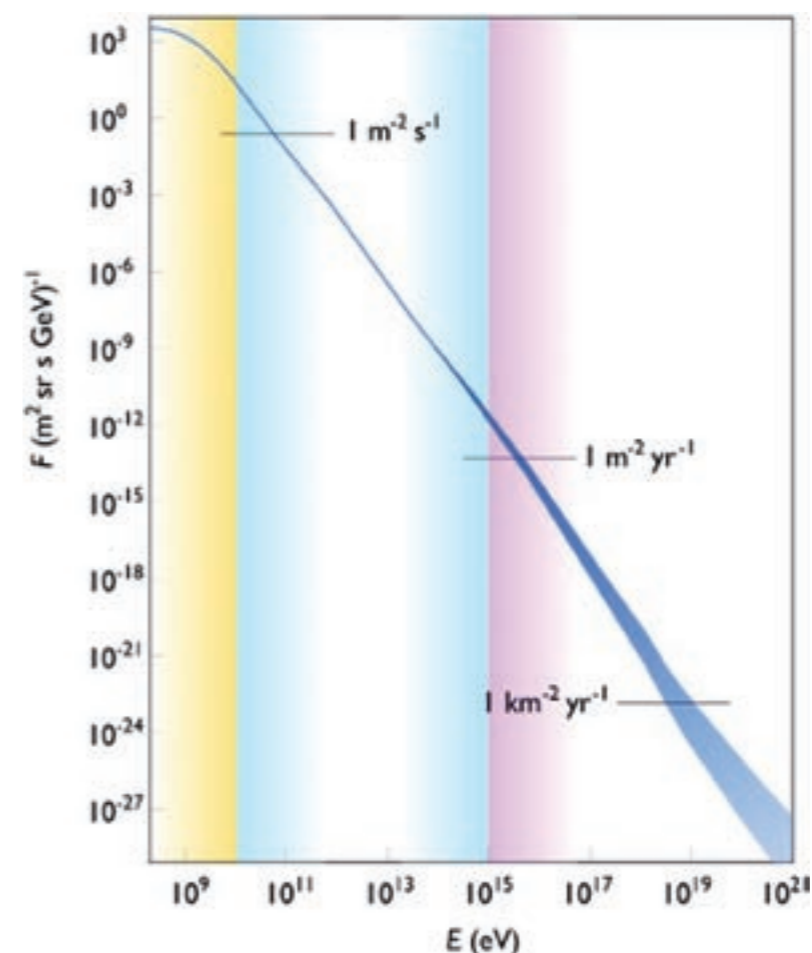
derado el hito científico más sobresaliente del año 2003 según dicha revista.

Hay otra componente neutra de la radiación cósmica que ha sido objeto de numerosos estudios desde hace varias décadas: los neutrinos. La observación de un aparente déficit del flujo de neutrinos, producidos en el proceso de generación de energía en el interior del Sol, y de asimetrías azimutales en el flujo de neutrinos, producidos al final de las cascadas originadas por la interacción de la radiación cósmica con la atmósfera, ha permitido, tras años de polémicas controversias experimentales y teóricas, validar el Modelo Estándar del Sol y proporcionar la primera prueba observacional que evidencia las limitaciones del Modelo Estándar de Partículas. Las medidas realizadas indican que, contrariamente a una de las hipótesis de partida de esta teoría, los neutrinos son partículas de masa no nula y tienen la propiedad de cambiar su identidad leptónica a través de un mecanismo cuántico denominado "oscilaciones de sabor".

La componente cargada de la radiación cósmica, electrones, positrones y núcleos atómicos, se ha estudiado con numerosos dispositivos experimentales, desde su descubrimiento en 1912 por el físico austriaco Victor Hess, Premio Nobel de Física en 1936. Los resultados obtenidos han sido de gran importancia en el campo de la Física de Partículas Elementales, aunque su relevancia para el conocimiento del Universo no es comparable, a día de hoy, con lo que ha aportado el estudio de la radiación

“El descubrimiento de la energía oscura a finales de la década de los 90 fue considerado por la revista Science el hito científico más sobresaliente del año 1998.”

Espectro energético de los rayos cósmicos cargados.



electromagnética. No es aventurado afirmar que, desde el punto de vista experimental, la Física de Partículas nace con el estudio de la radiación cósmica, herramienta que mantendrá su posición privilegiada hasta mediados de los años 50, cuando el advenimiento de los grandes aceleradores de partículas, la invención de la cámara de burbujas y, posteriormente, las cámaras proporcionales multi-hilos, cambiarían radicalmente el escenario de la investigación experimental del microcosmos.

El estudio de los rayos cósmicos cargados, durante cerca de 100 años, ha puesto de manifiesto que el flujo tiene una gran dependencia con la energía, como se muestra en la figura. Abarca cerca de 30 órdenes de magnitud y la energía llega a alcanzar valores macroscó-

picos, 10^{20} eV (unos 16 Julios). Su distribución angular es isotrópica. A pesar del extenso trabajo experimental y teórico realizado, quedan numerosas cuestiones por resolver: ¿cuáles son los mecanismos de aceleración?, ¿existe un valor máximo para la energía?, ¿cuáles son las fuentes de procedencia?, ¿cuál es su composición?, etc.

Es probable que el insuficiente conocimiento de los rayos cósmicos cargados tenga su origen en las dificultades experimentales para la realización de medidas precisas y de larga duración. Es evidente que la elección de una determinada técnica experimental viene condicionada, entre otras cosas, por la región del espectro de energías que desea estudiarse. Los distintos valores del flujo en función de la energía determinan el tamaño y posible localización de la instrumentación requerida.

La observación de la radiación cósmica cargada, con instrumentación desplegada en laboratorios convencionales en superficie, viene dificultada por la existencia de la atmósfera terrestre, que enmascara la naturaleza y propiedades de la radiación. Por otra parte, la operación en plataformas espaciales, que subsanarían estas limitaciones, de sistemas magnéticos, herramientas necesarias para la determinación del signo de la carga eléctrica, entraña dificultades experimentales considerables.

El instrumento AMS-02, instalado en la Estación Espacial Internacional, es un detector construido con las ideas y tecnologías desarrolladas para la experimentación en aceleradores de partículas, pero adaptadas a las exigentes condiciones del entorno espacial.

AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

La Estación Espacial Internacional, es un proyecto inicialmente concebido por la NASA, a principios de la década de los 80, en respuesta a los planes de la antigua Unión Soviética, que disponía de las estaciones espaciales SALYUT y MIR. El final de la carrera espacial propició una estrategia de colaboración internacional en la que Estados Unidos, Europa, Rusia, Japón y Canadá se asociaron con el objetivo de construir una única estación espacial para uso conjunto. El proyecto se aprobó en 1993, iniciándose el ensamblaje de sus componentes en noviembre de 1998. La plataforma se terminó de construir a finales de 2010. En marzo de ese año, las agencias espaciales responsables de la Estación acordaron extender la vida útil de la plataforma, inicialmente prevista hasta el 2015, hasta el año 2028.

El elemento esencial, en el proceso de ensamblaje en órbita de la ISS, son los trasbordadores espaciales de la NASA (Challenger, Columbia, Discovery, Endeavour, Atlantis) que transportan los distintos componentes de la plataforma. Un total de 35 misiones de los trasbordadores se han utilizado para construir la ISS. Con el vuelo del Atlantis, se dará por concluida la era de los trasbordadores espaciales de la NASA.

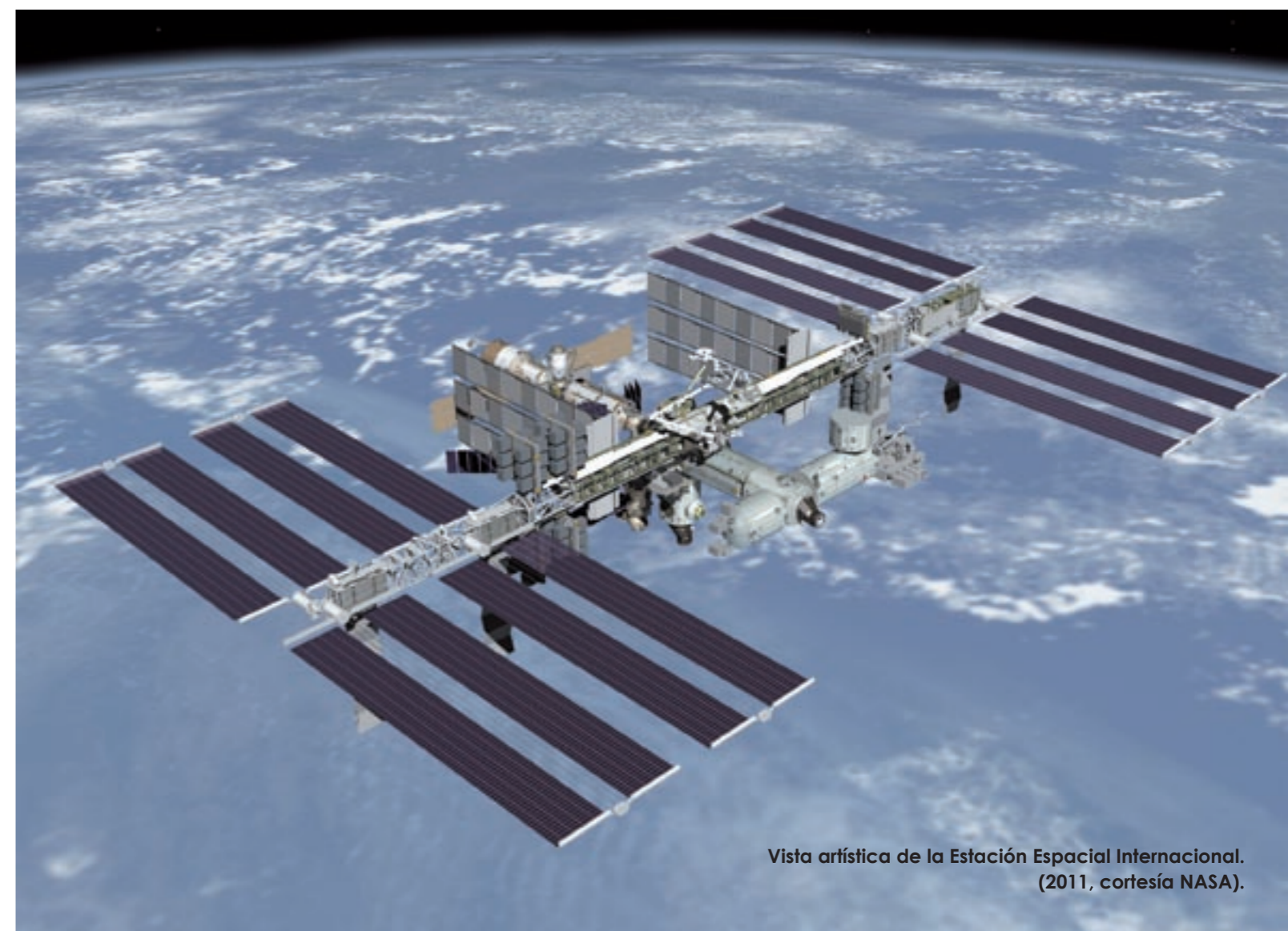
La ISS es la instalación científica de mayor coste construida hasta la fecha. El coste de esta instalación alcanza la cifra de 157 mil millones de dólares, más de 25 veces el coste del acelerador LHC (*Large Hadron Collider*) que el CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear con sede en Ginebra, Suiza) ha puesto en funcionamiento a finales del año 2009, o más de 10 veces el coste previsto del reactor experimental de fusión termonuclear por confinamiento magnético ITER (*Internacional Thermonuclear Experimental Reactor*) cuya construcción se completará dentro de 15-20 años.

Las dimensiones de la ISS son $108,5 \times 72,8 \times 27,40$ metros (longitud \times anchura \times altura) y pesa 471.736 kg. El volumen presurizado es de unos 1000 m³. La inclinación de la órbita es de 51,64 grados y la altitud típica es de 340,5 km. La velocidad de la ISS es de 27.743 km/hora y el periodo orbital es de 91,34 minutos. La tripulación prevista para su funcionamiento y apoyo a los programas de investigación es de 6 astronautas.

La fuente de energía eléctrica de la ISS es la radiación solar. Con la ayuda de paneles solares, con una superficie total de 375 m², que se orientan automáticamente para optimizar la colección de energía solar, se generan 89 kilovatios.

La ISS se mantiene en una órbita a una altitud mínima (máxima) de 278 km (460 km). A la altitud orbital de la ISS, la intensidad de la atracción gravitatoria debida a la tierra es el 88% de la medida a nivel del mar. Debido al desplazamiento en caída libre de la ISS, y de acuerdo con el principio de equivalencia, ésta se encuentra en condiciones casi idénticas a las de ausencia de gravedad y de ahí el calificativo de microgravedad que se da al entorno orbital de la Estación.

Uno de los objetivos principales de la ISS era proporcionar un lugar privilegiado para realizar programas experimentales que requerirían o se beneficiarían de las condiciones especiales presentes en la Estación. Los ámbitos de investigación más notables identificados hasta la fecha son biología (incluyendo biomedicina y biotecnología), física (incluyendo física de fluidos, ciencia de materiales y física cuántica), astronomía (incluyendo astrofísica y cosmología) y meteorología. Desde el año 2005, un segmento de la ISS ha sido designado como Laboratorio Nacional USA. Hasta la fecha, la actividad



Vista artística de la Estación Espacial Internacional. (2011, cortesía NASA).

investigadora en la ISS ha sido muy reducida, pero se espera que este año se pongan en marcha diversos programas especializados de investigación.

La ISS constituye una plataforma única para el estudio de la radiación cósmica primaria, al eliminar los problemas derivados de la existencia de atmósfera. Sin embargo, las restricciones impuestas por el limitado suministro eléctrico, el peso de la instrumentación y la anchura de banda disponible para la transmisión de información, así como las implicaciones debidas al entorno de vacío, microgravedad, radiaciones y variaciones de temperatura, constituyen un enorme desafío para el diseño, construcción y operación de instrumentación del tipo de la utilizada en experimentos de física de partículas.

“Con AMS-02 se inicia una nueva era en el estudio de la radiación cósmica cargada.”

AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

AMS-02: LA ODISEA TERRENAL DE UN DETECTOR DE RAYOS CÓSMICOS

AMS-02, es un experimento diseñado y construido para el estudio detallado (medidas de alta precisión y larga duración) de la radiación cósmica, con especial énfasis en la componente cargada. La elección de la plataforma espacial ISS tiene una ventaja fundamental: en la órbita de la ISS no hay contaminación atmosférica, lo que hace posible la medida precisa de las características de las partículas y núcleos cósmicos (masa, carga eléctrica, energía).

Los 100 km de espesor de la atmósfera equivalen a unos 10 m de espesor de agua o 2.5 m de aluminio. Esto implica que las medidas realizadas con instrumentos en superficie, o a bordo de globos sonda, vienen degradadas por las interacciones de la radiación cósmica primaria con el medio atmosférico. Esto dificulta la medida de la energía y hace inviable la determinación de la masa y carga eléctrica. Las técnicas de reconstrucción de la energía, a partir de las partículas secundarias detectadas, se basan en las técnicas y algoritmos calorimétricos desarrollados para experimentos de física

de partículas y, en ausencia de procedimientos fiables de calibración, generan importantes incertidumbres sistemáticas.

Desgraciadamente, la experimentación a bordo de la ISS no está libre de dificultades. Como indicó en 1995 el Dr. Daniel Golding, Administrador General de la NASA, "el espa-

“El objetivo científico era avanzar en el conocimiento del Universo y rastrear las reliquias de antimateria primordial.”

Vista del instrumento AMS-02 en la sala SSPF del KSC (4 marzo 2011).

cio es un entorno extremadamente hostil". Entre los más importantes desafíos, que entraña la investigación espacial, destacamos: limitación de peso, limitación de la potencia eléctrica disponible, limitación del ancho de banda, exposición a ciclos térmicos, microgravedad, vacío, vibraciones, aceleración y desaceleración, radiaciones, interferencias electromagnéticas, micro-meteoritos, la exigencia de redundancia y fiabilidad, la operación y mantenimiento de sistemas criogénicos y superconductores complejos.

Todos estos condicionantes han exigido, en el caso de AMS-02, un amplio, diversificado y ambicioso programa de I+D que, a su vez, ha necesitado, en algunos casos, la construcción de nuevas instalaciones, o la adaptación de las ya existentes, para realizar las pruebas de calificación espacial y proceder a la determinación de las prestaciones de sus componentes.

La idea de enviar al espacio un espectrómetro magnético, con capacidad para determinar el signo de la carga eléctrica de los rayos cósmicos, se remonta a mediados de los años 70 y se debe a L. Álvarez (Premio Nobel de Física en 1968) y G. Smoot (Premio Nobel de Física en 2005), concretándose en una propuesta, Astromag, que nunca llegó a convertirse en realidad.

En 1994, un reducido grupo de investigadores, liderado por el Profesor del Massachusetts Institute of Technology (MIT), Samuel C. C. Ting (Premio Nobel de Física en 1976), propusieron la construcción de un espectrómetro basado en un imán permanente, para su ubicación en la Estación Espacial Internacional. El objetivo científico era avanzar en el conocimiento del Universo y, en particular, rastrear las reliquias de antimateria primordial, abundantemente presente en el Universo primigenio.

Esta propuesta fue aprobada el 20 de septiembre de 1995 mediante acuerdo firmado por la NASA y el Departamento de Energía (DOE) del Gobierno de los Estados Unidos. En el acuerdo para la implementación de la propuesta, se especificaba que el proyecto debería realizarse en dos fases: una primera, de corta duración, a bordo de un trasbordador en misión logística a la Estación Espacial MIR, para validación conceptual y medida del ruido de fondo en condiciones reales, y una segunda, en la que el instrumento permanecería durante 3 años como módulo externo de la ISS para la realización del programa científico, al término del cual retornaría a la tierra.

En mayo de 1997, un grupo de investigadores del Departamento de Investigación Básica del CIEMAT aceptó la invitación del Profesor Ting, con quien venían trabajando desde 1981 en los laboratorios DESY (*Deutsches Elektronen Synchrotron*, Hamburgo, Alemania) y CERN (Ginebra, Suiza), para formar parte de la Colaboración AMS. En mayo de 2000, el Profesor Ting visitó el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) invitando a un grupo de sus investigadores a participar en el proyecto AMS.

En junio de 1998, se realizó la primera fase del proyecto AMS con un detector prototipo, AMS-01, ensamblado en el Instituto de Física de Partículas del *Eidgenössische Technische Hochschule* de Zürich (ETHZ). Esta fase se desarrolló con AMS-01 a bordo del trasbordador Discovery en la misión STS-91 de apoyo logístico a la Estación Espacial rusa MIR. La misión STS-91 despegó, desde el Kennedy Space Center, el 2 de junio y aterrizó el 12 de junio. Durante los 10 días de duración de la misión, AMS-01 registró aproximadamente 100 millones de rayos cósmicos, cuyo estudio demostró la viabilidad de un experimento de esta naturaleza en el espacio y su potencial científico.



AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

El diseño de AMS-01 incluía un imán permanente, un espectrómetro instrumentado con detectores de silicio para la medida de coordenadas de trayectorias, contadores de centelleo, un detector Cherenkov de tipo umbral, con aerogel de silicio como radiador, y la electrónica para selección de sucesos y adquisición de datos. La experiencia adquirida en esta primera fase aconsejaba, para la segunda fase del proyecto, reemplazar el imán permanente por un imán superconductor que incrementase el valor del campo magnético en un factor significativo, robustecer el espectrómetro con sensores de silicio adicionales, mejorar sensiblemente la capacidad de identificar partículas y, en particular, distinguir entre electrones y protones. También parecía prudente realizar la fase final de ensamblaje y pruebas en un laboratorio que pudiese aportar importante apoyo técnico en áreas críticas (vacío, criogenia, superconductividad, imanes, metrología, ingeniería, integración, tecnologías de la información, etc), así como en cuestiones administrativas y logísticas (transportes, compras, control de gastos, relaciones públicas, etc.). Estas eran, en cierta medida, las condiciones de contorno para la construcción del instrumento AMS-02.

Los componentes principales del instrumento AMS-02, en su configuración definitiva, son los siguientes.

- Un detector basado en el efecto de la radiación de transición (*Transition Radiation Detector*, TRD) para identificar positrones con un factor de rechazo a hadrones de 10^2 – 10^3 en el intervalo de energías 1.5–300 GeV.
- Cuatro planos de contadores de centelleo para la medida de tiempos (*Time of Flight*, TOF) con precisión de unos 120 picosegundos que proporcionan información sobre la pérdida de energía por ionización (dE/dx). El TOF es la herramienta principal del sistema de disparo (*trigger*) de primer nivel.

- Nueve planos de sensores de silicio, con unos 8 m² de área total, (*Silicon Tracker Detector*, STD) que proporcionan una resolución espacial en la medida de coordenadas de 10 μ m (30 μ m) en el plano de curvatura (en el plano ortogonal al de curvatura) e información sobre la pérdida de energía por ionización (dE/dx).
- Contadores de veto (*Anticoincidence Counters*, ACC) para asegurar que solo son aceptadas las partículas que atraviesan la apertura geométrica del imán.
- Un detector basado en el efecto de radiación Cherenkov (*Ring Imaging Cherenkov Radiation Counter*, RICH) que mide la velocidad de las partículas y núcleos atómicos con una precisión del 0.1 % y el valor absoluto de su carga eléctrica.
- Un calorímetro de muestreo 3D (*Electromagnetic Calorimeter*, ECAL) que mide la energía de los rayos gamma, electrones y positrones y distingue electrones y positrones de hadrones con un factor de rechazo 10^4 en el intervalo 1.5 GeV–1 TeV.
- Un imán permanente de forma cilíndrica, longitud 800 mm, diámetro interno 1115 mm y diámetro externo 1298 mm, con una aceptación geométrica de 0.82 m²sr. Este imán permanente ya fue utilizado en AMS-01 y proporcionaba un poder de curvatura $BL^2 = 0.15$ Tm². En el diseño original, AMS-02 tenía un imán superconductor, enfriado a la temperatura 1.8 K mediante 2500 litros de helio líquido superfluido, que proporcionaba un poder de curvatura $BL^2 = 0.86$ Tm². Como se relata más adelante, esta opción fue descartada por razones de índole diversa.

AMS-02 tiene dimensiones: 5 x 4 x 3 m³, pesa 7,5 toneladas, consume 2.5 kW y va equipado con 650 microprocesadores y 300.000 canales electrónicos. Los datos registrados serán transmitidos vía satélite con destino a distintos cen-

tros de investigación espacial, en Florida, Alabama y Texas, de Estados Unidos, y, posteriormente, también al CERN donde serán procesados, analizados y distribuidos a los centros de investigación que participan en el proyecto.

En 1997 el CERN aceptó el experimento AMS como "Recognized Experiment". En diciembre de 2003 el CERN y la Colaboración AMS firmaron un "Memorandum of Understanding" (MOU), por una duración de 5 años, que se renovó por otros 5 años en junio de 2008 y al que se añadió un apéndice en 2010. En virtud de estos acuerdos, el CERN aceptó conceder espacio en la zona de Preveessin para la construcción de una sala limpia de 700 m² y clase 10000, financiada por la Colaboración AMS, en la que se ha ensamblado el instrumento AMS-02. El CERN también aceptó albergar el Centro de Operaciones y Control (*Payload Operation and Control Center*, POCC), para lo cual se ha construido un nuevo edificio en la zona de Preveessin, e instalar el Centro de Ciencia (*Science Operation Center*, SOC) en el Centro de Cálculo de la Organización.

El 1 de febrero de 2003 el trasbordador Columbia, que estaba a punto de concluir la misión STS-107, se desintegró al entrar en la atmósfera causando la muerte de sus siete tripulantes.



AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

Este incidente acarreó la inmediata cancelación de los vuelos de los trasbordadores, que solo se reanudarían en 2005, y fijó el año 2010 como fecha límite para los vuelos de los trasbordadores y el año 2015 como fin de la vida útil de la Estación Espacial Internacional.

El 5 de octubre de 2005, el Dr. Michael Griffin, Administrador General de la NASA, comunicó que la NASA no dispondría de un vuelo para llevar AMS-02 a la Estación Espacial y que, en consecuencia, desaparecería de la lista de vuelos (*Shuttle Space Manifest*). Afortunadamente, la NASA continuó financiando las actividades de sus equipos en el KSC y en el JSC (*Johnson Space Center, Houston, Texas*) asignados al proyecto AMS. Esta decisión, aparentemente contradictoria con la anterior, ha sido clave para completar satisfactoriamente el proyecto.

En julio de 2007 se completó la construcción de la sala limpia destinada a la integración de AMS-02 en el área de Preveissin del CERN. A partir de ese momento, los distintos subsistemas, diseñados, contruidos y probados en los diferentes centros que integran la Colaboración AMS, empezaron a llegar al CERN para proceder a la integración final. Un primer ejercicio de integración se realizó durante 10

meses utilizando una réplica no instrumentada (*STA—Structure Test Article*) del imán superconductor, cuya construcción en la empresa Space Cryomagnetics Ltd (SCL) se encontraba en fase avanzada, aunque no exenta de dificultades técnicas. Durante estos meses se rediseñó y puso a punto en el CERN el sistema criogénico auxiliar para el imán superconductor (*CGSE—Cryomagnet Ground Support Equipment*).

El imán superconductor llegaría al CERN en diciembre de 2008, procediéndose al comisionado del mismo e iniciándose la fase fi-

nal de integración de AMS-02 y calibración con rayos cósmicos, tareas que se completarían en enero de 2010. A principios de febrero de 2010 el detector se calibró con haces de partículas (electrones, protones y fotones) de distintas energías en el área Norte de experimentación del CERN.

En octubre de 2008, tras una intensa actividad del Comité Ejecutivo de la Colaboración AMS con miembros del Congreso y del Senado de Estados Unidos, el Presidente Bush firmaría la resolución H. J. Res. 6063 por la que se aprobaba un vuelo adicional de

un trasbordador espacial para transportar AMS-02 a la Estación Espacial.

En febrero de 2010 el instrumento AMS-02 se transportó al centro ESTEC (*European Space Research and Technology Centre*) de la Agencia Europea del Espacio en Noordwijk (Holanda) para la realización de las pruebas de calificación espacial en la cámara Maxwell (compatibilidad electromagnética) y en el gran simulador espacial (ciclos térmicos). Aunque las medidas realizadas en ESTEC hasta mediados de abril fueron satisfactorias, la determinación de la carga de calor, que determina el con-



Lanzamiento de Endeavour en la Misión STS-134 (16 de mayo de 2011, cortesía NASA).



Delegación española en el KSC (28 de Abril 2011).

AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

sumo del helio líquido superfluido (2500 litros) y condiciona la duración funcional del imán, resultó superior a lo requerido en las especificaciones técnicas. La operatividad efectiva del imán sería de 20 ± 4 meses, en lugar de los 3 años exigidos. Aunque esta estimación podría mejorarse utilizando frío-refrigeradores de última generación, las pruebas realizadas revelaban incertidumbres de índole diversa (en particular, relacionadas con el posible tiempo de espera de AMS-02 en la rampa de lanzamiento del KSC y los efectos debidos a cargas próximas al instrumento una vez anclado en la ISS) que no permitían hacer una determinación absolutamente fiable de la vida útil del imán.

En marzo de 2010, al tiempo que seguían realizándose pruebas en ESTEC, las Agencias responsables de la Estación Espacial acordaron extender el funcionamiento de la Estación hasta el año 2028, al tiempo que confirmaban el año 2011 como fecha límite para los vuelos de los trasbordadores de la NASA. Esta segunda consideración eliminaba el retorno de AMS-02 a tierra, como estaba inicialmente establecido en el acuerdo NASA-DOE de 1995, y hacía prácticamente inviable la opción, técnicamente posible, de rellenar en órbita el depósito de helio.

La prolongación de la vida útil de la Estación y la limitada duración operativa del imán superconductor aconsejaron, en abril de 2010, descartar su utilización y remodelar AMS-02 con el imán permanente utilizado en el vuelo precursor con AMS-01. Esta opción fue aprobada por la NASA que, desde el incidente ocurrido en la red magnética del LHC del CERN en septiembre de 2008, tenía ciertas reticencias acerca de la idoneidad de un imán superconductor operando en la Estación Espacial. El menor campo magnético generado por el imán permanente aconsejaba una reconfiguración del espectró-

metro que implicaba una diferente disposición espacial de los planos de sensores de silicio y la adición de un plano complementario.

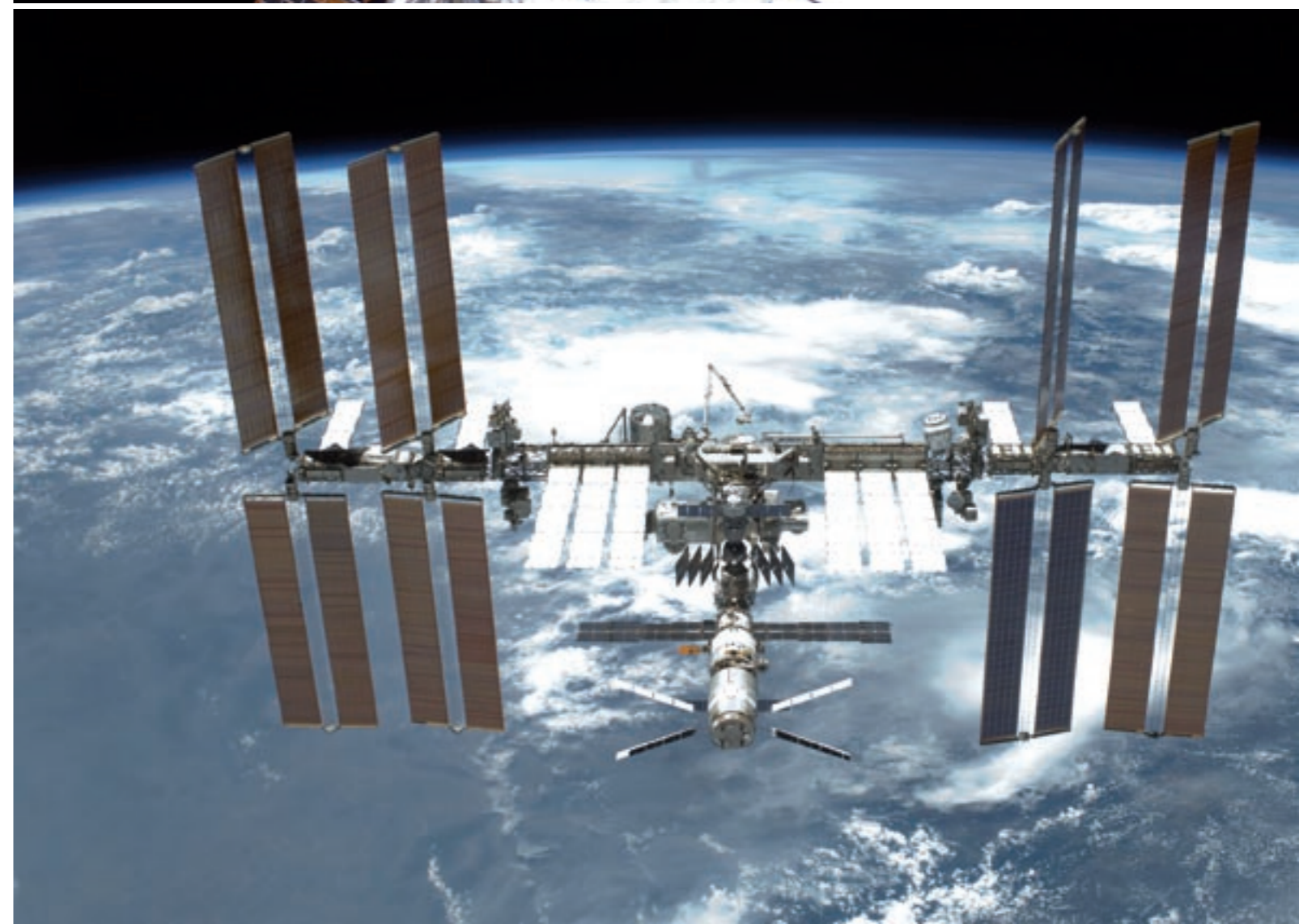
Con objeto de proceder a esta importante remodelación, el instrumento se transportó al CERN el 25 de abril de 2010. Las tareas de remodelación se completaron a principios de agosto, repitiéndose a continuación las calibraciones con haces de partículas. El 24 de agosto AMS-02 abandonó el CERN en dirección al aeropuerto de Cointrin en Ginebra y el día 26, a bordo de un avión Super Galaxy C5 de las fuerzas aéreas estadounidenses, despegó en dirección al KSC. A su llegada al KSC, ese mismo día, se inició en la *Space Station Processing Facility (SSPF)* el proceso de ajuste de interfaces con el trasbordador Endeavour y con la Estación Espacial Internacional. En paralelo, se ponían a punto los centros temporales de control y operación en el KSC y en el JSC, mientras que, en el CERN, se construía el edificio que albergará el centro operativo principal a partir de julio de 2011.

En noviembre de 2010, AMS-02 estaba listo para su ubicación en la bodega del Endeavour, cuya puesta a punto en el *Orbiter Processing Facility (OPF)* se completaba el 28 de febrero de 2011. El 10 de marzo, una vez integrados en el *Vehicle Assembly Building (VAB)* el depósito de combustible líquido externo (ET-External Tank) y los cohetes propulsores con combustible sólido (SRS-Solid Rocket Boosters), el Endeavour se desplazó a la rampa de lanzamiento (Pad 39-A). El 26 de marzo AMS-02 se instalaba en la bodega del Endeavour completándose el proceso.

Tras retrasos importantes (casi 4 meses), ocasionados por problemas técnicos en la misión STS-133, que finalmente realizó el Discovery desde el 24 de febrero al 9 de marzo, la misión

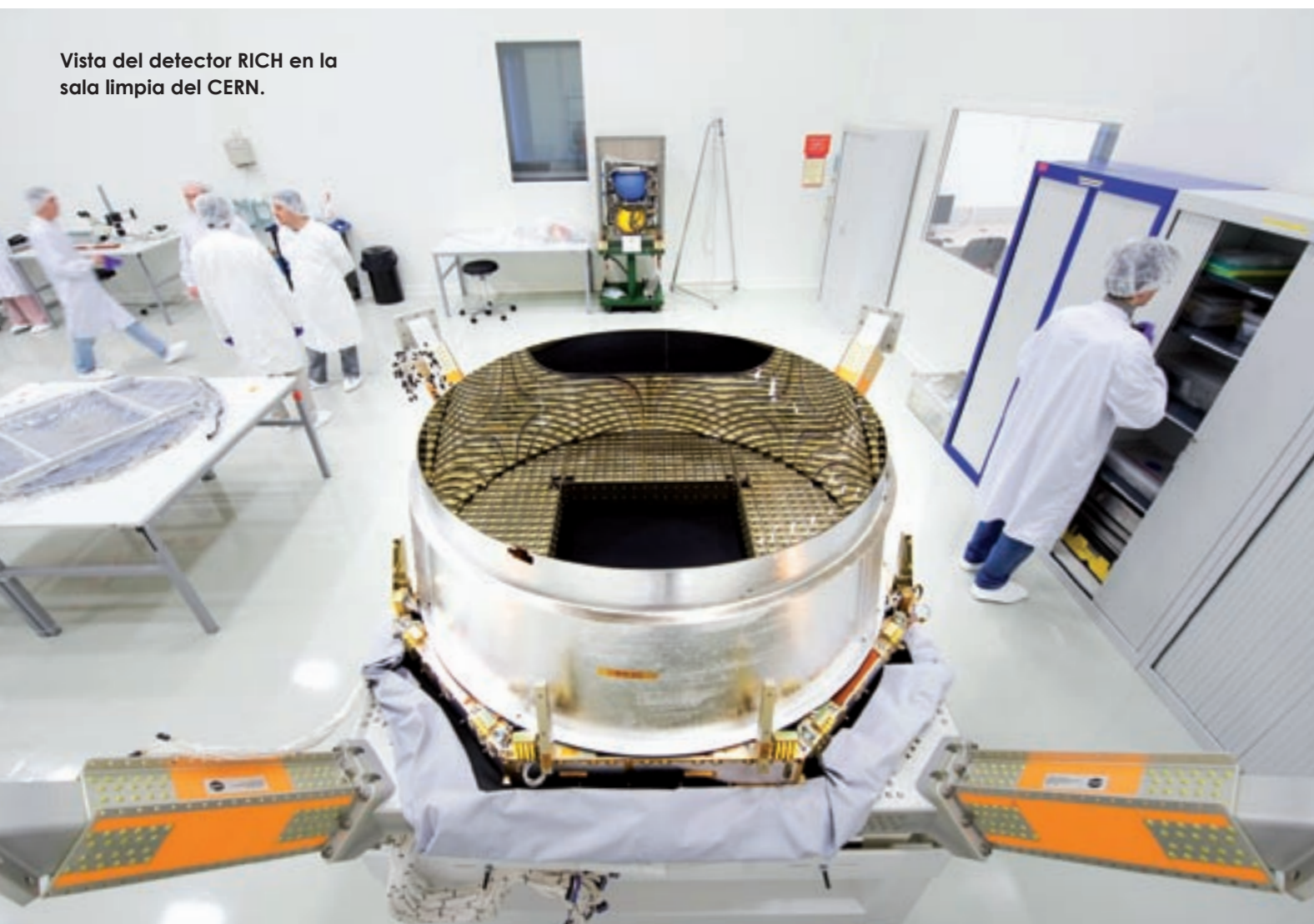


Dos vistas de AMS-02 en el eje S3 de la Estación Espacial Internacional (20 de mayo de 2011, cortesía NASA).



AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

Vista del detector RICH en la sala limpia del CERN.



“España ha liderado, junto con Estados Unidos, Italia, Alemania, Francia, Suiza y Taiwan, el proyecto científico de mayor envergadura en la búsqueda de antimateria y materia oscura en el Universo: la construcción del instrumento AMS-02.”

STS-134 debía iniciarse el 19 de abril. Por restricciones de tráfico en la Estación el lanzamiento se retrasó al 29 de abril, y, debido a problemas eléctricos en el Endeavour, se produjo un nuevo retraso. Finalmente, el 16 de mayo a las 8:56 a.m. EDT tuvo lugar el lanzamiento. El día 18 tuvo lugar el amarre con la Estación y el día 19 el traslado de AMS-02 desde la bodega del Endeavour a su posición definitiva en el eje S3 de la Estación. Una vez realizadas las conexiones eléctricas y activadas las líneas de transmisión de información, AMS-02 ha comenzado a enviar datos al Centro de Operaciones y Control en el JSC y, desde éste, al Centro de Ciencia en el CERN, que demuestran el correcto funcionamiento de todos los subsistemas del detector.

FÍSICA FUNDAMENTAL CON AMS-02

AMS-02 estudiará la naturaleza y composición de los rayos cósmicos cargados y de la abundancia relativa de los isótopos ligeros, proporcionando valiosa información acerca de los mecanismos de aceleración, los modelos de propagación y la densidad de materia interestelar. La medida precisa de los flujos de antiprotones, positrones y rayos gamma permitirá profundizar en la comprensión de la naturaleza de la materia oscura. También buscará evidencia de la existencia de antimateria cósmica primaria con una sensibilidad 10^3 – 10^6 superior a los límites actuales y posibles nuevos fenómenos como, por ejemplo, materia extraña.

PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN LA CONSTRUCCIÓN DE AMS-02

España ha liderado, junto con Estados Unidos, Italia, Alemania, Francia, Suiza y Taiwan, el proyecto científico de mayor envergadura en la búsqueda de antimateria y materia oscura en el Universo: la construcción del instrumento AMS-02.

La participación española en el proyecto AMS está dirigida por el Departamento de Investigación Básica del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), Organismo Público de Investigación, dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), con notable reputación internacional en el campo de la Física y Astrofísica de Partículas Elementales. En el proyecto también participa el Instituto de Astrofísica de Canarias, igualmente dependiente del MICINN, con larga tradición en el campo de la Astronomía y Astrofísica.

Investigadores del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), dependiente del Ministerio de Fomento, han participa-

do en algunas fases del proyecto. Igualmente relevante ha sido el soporte tecnológico del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), dependiente del Ministerio de Defensa, en donde se han realizado pruebas de calificación espacial de la instrumentación construida en España.

En el proyecto de construcción de AMS-02, la contribución de diversas empresas españolas, con contrastada experiencia en distintos campos de la investigación aeronáutica y aeroespacial, ha sido esencial. En particular EADS-CRISA, líder a nivel mundial en el campo de la microelectrónica espacial, e IberEspacio, con consolidada experiencia en el uso de tecnologías térmicas para misiones espaciales.

La participación española en el proyecto AMS, que se inició en 1997, ha sido financiada por el propio CIEMAT, el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) y por subvenciones a proyectos de investigación con cargo a diversos Programas Nacionales (Espacio, Física de Partículas, Astronomía y Astrofísica) del Plan Nacional de Ciencia y Tecnología.

La contribución española se ha focalizado en tres áreas relevantes:

- El diseño, construcción y validación de un detector (*Ring Imaging Cherenkov Counter*, RICH) para la medida precisa de la velocidad y carga eléctrica de las partículas y núcleos atómicos cósmicos. Este subsistema se integró en una sala limpia construida para este fin en el CIEMAT. El grupo del CIEMAT coordinó las actividades de integración con el resto del instrumento y las pruebas de funcionalidad y verificación de prestaciones con rayos cósmicos, con haces de partículas en el CERN y en ESTEC, así como las pruebas definitivas del RICH realizadas en el JSC y el JSC.

AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

- El diseño, construcción y validación del sistema electrónico de control del imán superconductor (*Avionics Box*), que tenía como misión cargar eléctricamente el imán, realizar la telemetría con los 200 sensores que controlan la temperatura, presión, voltaje de la instrumentación criogénica y proteger y reactivar la operación del imán en el caso de una transición al estado resistivo (*quench*). En este proyecto, el CIEMAT actuó como soporte interlocutor entre EADS-CRISA y AMS y también contribuyó a la financiación de diversas tareas en la empresa británica SCL (*Space Cryomagnetics Limited*), encargada del diseño y construcción del imán superconductor. La experiencia acumulada en criogenia y supercon-
- ductividad en entornos espaciales será de gran utilidad para el desarrollo de misiones espaciales tripuladas de larga duración.
- La contribución a la gobernanza de la Colaboración AMS, asumiendo la responsabilidad de la elaboración de un documento (*Memorandum of Understanding*) entre el CERN y AMS para la integración de AMS-02 en el CERN. Asimismo, fue responsabilidad del CIEMAT la redacción del documento de acuerdo entre todas las instituciones que forman parte del proyecto para estructurar el funcionamiento de la Colaboración AMS y la financiación de tareas durante las fases de ensamblaje y operación del instrumento en el CERN, ESTEC, KSC, JSC e ISS.



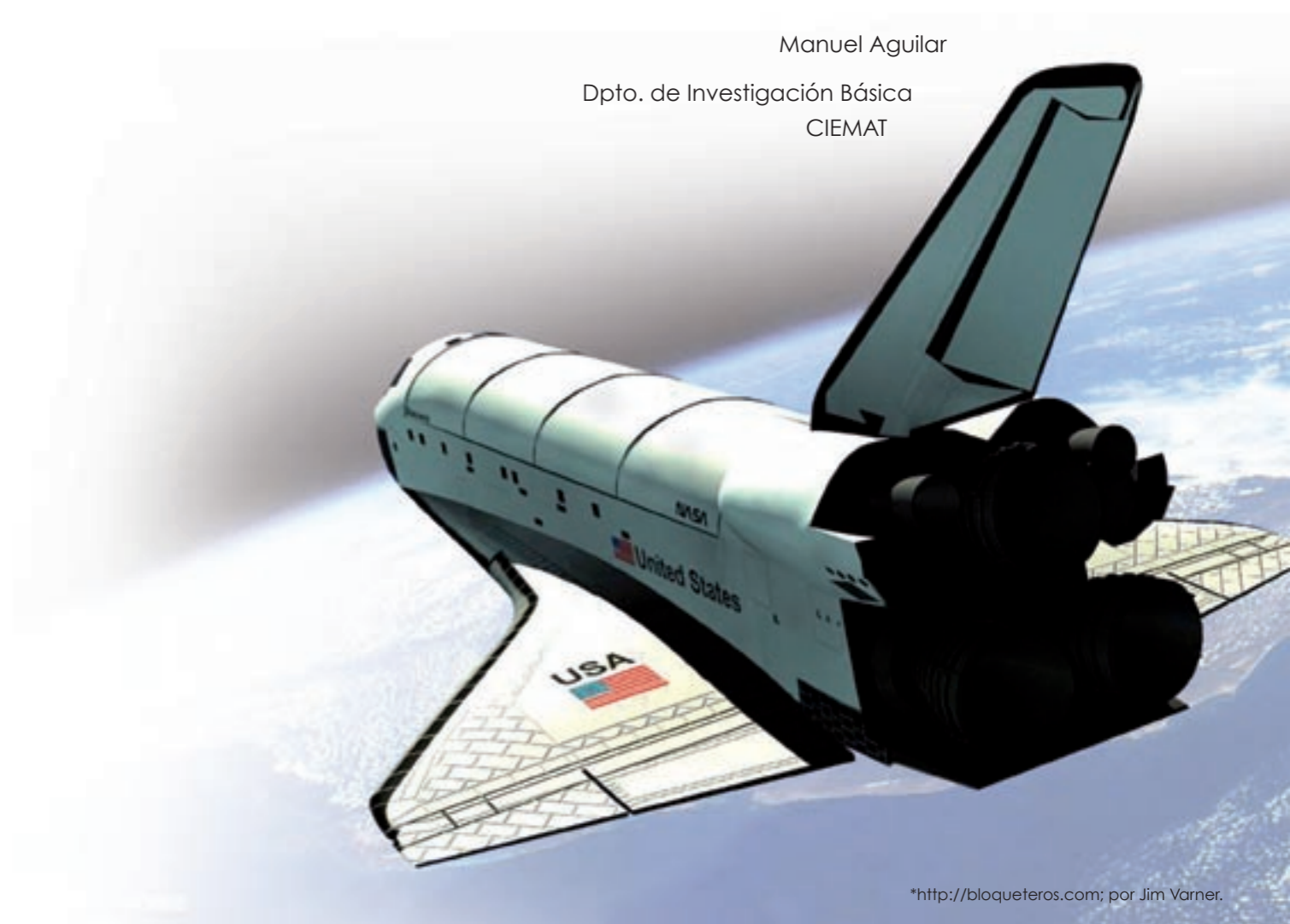
El grupo AMS-CIEMAT.

EPÍLOGO

AMS-02 es un excepcional instrumento científico que permitirá investigar en condiciones experimentales óptimas cuestiones científicas de máxima relevancia (trazas de antimateria cósmica primaria, señales de materia oscura) y tal vez poner de manifiesto fenómenos nuevos que solo esta novedosa y robusta instrumentación y el entorno privilegiado que ofrece la Estación Espacial Internacional hace posible. Con AMS-02 se inicia una nueva era en el estudio de la radiación cósmica cargada que confiamos conduzca a la obtención de resultados científicos tan relevantes como los obtenidos con la componente neutra de la misma.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo quiere agradecer a todos los miembros del grupo AMS-CIEMAT y, muy en particular, a Javier Berdugo, Jorge Casaus, Ignacio Cernuda, Carlos Delgado, Carlos Díaz, Joaquín García, Francesca Giovacchini, Carlos Mañá, Jesús Marín y Gustavo Martínez, la excepcional dedicación y el excelente trabajo realizado durante el desarrollo de este fascinante y difícil proyecto.



Manuel Aguilar

Dpto. de Investigación Básica
CIEMAT