



con CIENCIAS.digital

Revista digital de la Facultad de Ciencias de Zaragoza

<http://ciencias.unizar.es/aux/conCIENCIAS/numero4.pdf>

Nº 4 NOVIEMBRE 2009

LA CIENCIA: UN ESPACIO PARA TODOS



Redacción

DIRECCIÓN:

- Ana Isabel Elduque Palomo

SUBDIRECCIÓN:

- Concepción Aldea Chagoyen

DISEÑO GRÁFICO Y MAQUETACIÓN:

- Víctor Sola Martínez

COMISIÓN DE PUBLICACIÓN:

- Enrique Manuel Artal Bartolo
- Blanca Bauluz Lázaro
- Javier Fernández López
- Ángel Francés Román
- 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

Imágenes: fuentes citadas en pie de foto.

Portada: fotocomposición *comet Hale-Bopp* y *Reischtag* (www.flickr.com)

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



<u>Editorial</u>	4
<u>El aceite de oliva, un reto para los científicos</u> Jesús de la Osada	6
<u>La renovación del paisaje</u> Francisco García Novo	12
<u>La magia de las astropartículas</u> Clara Cuesta, Carlos Pobes y María Luisa Sarsa	28
<u>Planetas y exoplanetas II</u> Antonio Elipe	32
<u>El Universo desde Javalambre</u> Mariano Moles	38
<u>Mi despacho</u> Pablo Echenique	56
<u>Matemáticas, ¿puras o aplicadas?</u> <u>El caso de la geometría proyectiva</u> Fernando Etayo	62
<u>Vigencia y actualidad de la teoría de la evolución</u> José Adolfo de Azcárraga	74
<u>¡Arde la Facultad!</u> Ana Álvarez	96
<u>La nueva Ley de Ciencia y Tecnología</u> Ana Isabel Elduque	102
<u>Espacio Europeo de Educación Superior</u> Enrique Artal	114
<u>Actividades</u>	120
<u>Noticias</u>	128

La Ciencia: un espacio para todos

El año 2009 pasará a la historia como el año de la crisis económica que azotó globalmente al Planeta Tierra. Hemos de decir que en **conCIENCIAS** hemos aprovechado el año para crecer un poco más y aumentar tanto el conjunto de ideas que queremos desarrollar, como el elenco de colaboradores sin los que este proyecto no sería posible. Por esto hemos decidido titular a este número 4 como *La Ciencia: un espacio para todos*, ya que es una de las frases que mejor resume lo que estamos intentando.

Junto a las actividades de carácter divulgativo que han proliferado como consecuencia de la celebración del Año Internacional de la Astronomía y del Bicentenario del nacimiento de Darwin, **conCIENCIAS** ha sido receptora de un amplio abanico de aportaciones de variada temática, que nos van a permitir continuar con la labor editorial sin miedo a falta de artículos.

También hemos querido ampliar la base de colaboradores, y no ceñirnos únicamente ni a personal de la Facultad ni tan siquiera de nuestra Universidad. Un artículo sobre algo tan nuestro como el aceite de oliva, otro sobre la biodiversidad, la teoría de la evolución, el universo... son muestras de que nuestro proyecto ha saturado el espacio inicial donde fue concebido y está comenzando su andadura por paisajes más amplios. Esta fue nuestra idea inicial, pero siempre es satisfactorio ver como nuestro *pequeño*

“La divulgación, como la Ciencia, debe ser un espacio para todos.”

universo se expande. Sólo nos falta la fase inflacionaria para convertirnos en algo realmente grande. Pero todo se andará.

Pero no todo es ciencia fría y racionalista. Así, hemos querido incluir un espacio muy particular, “El espacio de trabajo de nuestro compañero Pablo Echenique”. No os cuento más. Os remito a la página 56. El artículo de Pablo destila humanidad en todas las dimensiones de su “espacio”.

A la fecha de publicación de este número, casi habremos finalizado la primera etapa de la construcción del EEES. Los planes de los nuevos grados, aceptados por todos los órganos de nuestra Universidad, ya han sido remitidos para su aprobación final. Hemos incluido un artículo sobre las titulaciones que vamos a impartir. Gracias a todos los que han participado en la elaboración de los planes de los nuevos grados. Profesores de esta Facultad y de otras, colaboradores internos y externos, alumnos, personal de administración y servicios y a cualquiera que haya aportado su granito de arena.

Aún sin haberlo buscado así, hemos incluido también un artículo comentando nuestra primera impresión del borrador de la ley de Ciencia. En este año, en el que el monto asignado a I+D+i en los Presupuestos Generales del Estado ha generado una importante polémica, puede parecer oportunista el citado artículo. Por ello os pido que lo leáis para que podáis comprobar por vosotros mismos que huye de la polémica y se centra en aspectos ajenos a la mera consignación de recursos económicos.

A todos los colaboradores y a aquellos que creáis que este proyecto está resultando más que interesante os quiero decir que hemos provocado curiosidad en un amplio y variado sector de lecto-

res. También hemos recibido las felicitaciones y, por qué no decirlo, “hasta nos han tirado los tejos” desde empresas editoriales bien afianzadas en nuestro país. Es un orgullo comentarlo, pero también es de justicia que los que tan altruistamente estáis colaborando sepáis que vuestro trabajo está siendo juzgado más que interesante por muchas personas “ahí fuera”.

Pero el objetivo es, y creo que así debe seguir siendo, divulgar la Ciencia en nuestra Sociedad. Y cuanto más lejos lleguemos, mejor. Para ello seguimos precisando continuar con este lenguaje sencillo, directo y asequible, con una variedad extensa de temas, con un conjunto amplio de colaboradores. El rigor científico requiere profesionalidad al máximo y la divulgación, como parte de la Ciencia, también. Pero rigor no significa ni hermetismo ni ininteligibilidad. La divulgación exige una comunicación fluida con nuestros lectores. Es decir, la divulgación, como la Ciencia, debe ser un *espacio para todos*.

Pero ser una plataforma de divulgación libre y seria no quiere decir carente de coherencia interna. Sin pretender enjuiciar las iniciativas de otros, queremos

que **conCIENCIAS** se caracterice por ser precisamente eso, divulgación científica. Y ello supone que tanto el proyecto en sí, como todos los que se explican o apoyan en sus artículos, deben huir de la especulación y de la fabulación.

Espero que este número 4 os agrade y os anime a colaborar en el próximo número. También hay un espacio para ti.

Un saludo a todos y hasta el **conCIENCIAS** nº 5.

Ana Isabel Elduque Palomo
Directora conCIENCIAS



Cloud Gate, Chicago, EEUU.

*Foto por A. I. Elduque



EL ACEITE DE OLIVA

UN RETO PARA LOS CIENTÍFICOS

Al recibir la amable invitación de la Dra Elduque para participar en la revista, voy a abordar un tema, como diría un profesor mío, donde mi ignorancia es menor, y que presenta cierto interés para nuestra sociedad. No puede ser otro que una breve introducción al aceite de oliva, un tema apasionante que es el objetivo de nuestro grupo de investigación desde 1996.

El aceite de oliva es el zumo de las aceitunas obtenido tras su molienda y prensado. Esta aparente sencillez esconde una complejidad que ocupa a bastantes científicos de nuestro y de otros países mediterráneos: Francia, Italia, Grecia, Turquía, Túnez. Algunos aspectos de la misma voy a presentarlos a continuación. Para empezar, no hay un único aceite de oliva. El aceite de oliva obtenido de las distintas variedades de olivos es diferente en cuanto a su composición química. Son más de 358 los tipos de árboles que se han cultivado en la cuenca mediterránea y que se han recopilado en el banco mundial de germoplas-

POR JESÚS DE LA OSADA

El aceite de oliva, un reto para los científicos

ma de Córdoba. En Aragón, las variedades Empeltre o Arbequina resultarán más familiares, pero existen otras muy extendidas en España como la Cornicabra, la Manzanilla, la Picual o la Hojiblanca. Si ampliamos nuestra mirada a los países antes mencionados, nos encontramos otras como Leccino, Moraiolo, Frantoio, Pendolino, Taggiasca y Colomabaia de Italia, y la Koroneiki y la afamada Calamata de Grecia, por citar ejemplos bien conocidos gracias a las grandes habilidades comerciales de italianos y griegos. Igualmente existen diferentes variedades en Turquía y Túnez. Tenemos, por tanto, más de 358 aceites de oliva diferentes sólo por la procedencia de la aceituna.

Un segundo aspecto, que igualmente afecta a las características del aceite de oliva, proviene del cuidado de las aceitunas tanto cuando están en el árbol como después. Antes de la recogida, el principal enemigo es la mosca "Bactrocera oleae" que pone el huevo

y su larva crea agujeros en la aceituna. Evitar el daño de la misma es importante para que la entrada de aire por ese agujero no oxide el aceite en el fruto. El momento de recogida de la aceituna es, también, un factor que va a modificar el aceite y se está estudiando cuándo puede ser el momento más oportuno. En Aragón, en contraposición a Andalucía, se recoge muy tarde cuando el fruto está completamente negro. Sería importante evaluar la influencia que tendría una recogida más temprana en el rendimiento y características del aceite. También, es tremendamente importante el tiempo transcurrido entre la recogida y su entrega en la almazara y molienda. Este tiempo, afortunadamente, se ha reducido mucho y han pasado a la historia aquellos aceites que se obtenían con aceitunas apelmazadas, fermentadas y a veces enmohecidas. Hoy no servirían para el consumo humano con los criterios que se emplean. En la Unión Europea, son muy básicos: el primero es el grado de acidez. El aceite posee ácidos, denominados grasos, que han de ir unidos a un alcohol. Para el aceite de oliva, el ácido graso más abundante es el ácido oleico y va unido al alcohol glicerol. De hecho, este alcohol une tres ácidos oleicos. Cuando se mide la acidez, se está buscando el ácido oleico separado de su alcohol. Cuanto mayor sea, peor es el aceite y con valores superiores a 3, el aceite no puede usarse para el consumo humano.

El segundo criterio que han de cumplir los aceites es el nivel de peróxidos. Si, como ya he mencionado anteriormente, existen

Óleo de M^a Pilar Carpintero.

Representación de la obtención del aceite a partir de la aceituna. Agradezco a su autora el permiso para reproducir su lienzo.

agujeros en la aceituna, por estos entra aire que oxida a los ácidos grasos, fundamentalmente a dos: el ácido linoleico y el linolénico. Estos no son tan abundantes como el ácido oleico, pero están presentes y se oxidan con más facilidad. Los productos de la oxidación son los peróxidos y son responsables del sabor y olor rancio. Algo que los más mayores fácilmente recordarán de aquellas viejas zafra. Igual que en el caso de la acidez, cuanto más alto es el nivel de peróxidos, peor calidad del aceite y con valores superiores a 20, el aceite no puede usarse para personas.

El tercer requisito que han de superar los aceites es el de ser transparentes a la luz ultravioleta, concretamente a la longitud de onda de 270 nm. Si el aceite no deja pasar esta luz, implica que hay algo que la detiene y que no debería estar. La medida de la transparencia se denomina K_{270} y cuanto más alta indica peor calidad. Con valores superiores a 2, el aceite no es apto para las personas.

Por último, se exige la puntuación de un panel de catadores entrenados para probar aceites. Nuestra lengua, parte posterior de la boca y nariz son un extraordinario laboratorio de análisis ya que pueden reconocer miles de compuestos químicos. Claro está que, como otras muchas facetas de la actividad humana, esto requiere un entrenamiento. Los catadores son personas con excelentes facultades de gusto y olfato entrenados para reconocer pequeñas imperfecciones en los aceites. Cuando paladean los aceites, les otorgan una puntuación tanto mayor cuanto menos imperfecciones notan.

Con los anteriores aspectos, los aceites de oliva del mercado se catalogan en tres categorías:

- **Aceite de oliva virgen extra:** es el mejor de todos, posee una acidez inferior a 0'8, un nivel de peróxidos inferior a 20, un K_{270} menor de 0,22 y la máxima puntuación del panel de catadores (mayor de 6,5) o sea sabor irreprochable.

“ El aceite de oliva es el zumo de las aceitunas obtenido tras su molienda y prensado. ”

- **Aceite de oliva virgen:** ya no cumple los requisitos anteriores, puede tener una acidez inferior a 2, un nivel de peróxidos inferior a 20, el K_{270} menor de 0'25 y alcanza una puntuación del panel de 5'5.
- **Aceite de oliva:** es el corriente, posee acidez inferior a 1'0, nivel de peróxidos inferior a 15, K_{270} de 1, no se valora por panel de catadores. Este no se obtiene como tal, sino que es una mezcla de aceites de baja calidad que se refina, junto con aceite de oliva virgen.

Como se desprende de este somero panorama, conseguir el aceite de oliva virgen extra debe ser la meta de todo productor porque representa lo mejor que hoy se puede conseguir. Una vez conseguido, el objetivo es mantener año tras año ese nivel de excelencia, lo cual no es fácil. Hay que buscar nuevas formas de controlar la mosca que no impliquen el empleo de pesticidas. Adaptar la recogida al momento más oportuno y verificar la calidad de la aceituna, que se recoge en la almazara, con más criterios que el rendimiento y la cantidad aportada.

En el proceso de manipulación y entrega al consumidor, hay todo un mundo de innovación posible para minimizar la exposición al aire, luz y calor. La vigilancia en los mercados para evitar sus fraudes precisará de científicos que desarrollen sencillos y fiables procedimientos de verificación.

Si se consigue y consolida esa meta de un aceite de oliva virgen extra de excelente calidad, existen oportunidades de nuevos mercados. De



El aceite de oliva, un reto para los científicos



hecho, en Estados Unidos y Alemania su consumo empieza a despegar al igual que ocurre en China. El mayor éxito, indudablemente, es entrar en el mercado japonés, el nivel de exigencia para pasar las aduanas de ese país es el no va más de control analítico; así se ha de vigilar el nivel de pesticidas y la huella analítica de compuestos minoritarios. Este último aspecto, que hoy precisa de tecnologías analíticas de una Facultad de Ciencias, se ha de simplificar para poder extender su control en varias etapas del proceso de distribución, como he mencionado anteriormente. Se trata este aceite de oliva virgen extra de un vehículo de triglicéridos capaz de transportar centenares de sustancias lipó e hidrosolubles que pueden experimentar cambios con los procesos reflejados.

Por último, y no menos importante, estos aceites de oliva virgen extras poseen propiedades biológicas de retraso de una gran variedad de enfermedades en nuestra y en otras especies. Así se ha demostrado su potencial antiaterosclerótico, su papel en la prevención del cáncer de mama, en el retraso del deterioro cognitivo etc. Este aspecto, particularmente dinámico de la investigación en el campo, ha

contribuido a cambiar la percepción social de su uso y a aumentar su consumo en nuestra sociedad.

El olivo, su fruto y su zumo son hoy, más que nunca, un terreno multidisciplinar donde participan distintos profesionales aportando su peculiar formación para conseguir el máximo aprovechamiento para su uso humano. No en vano se trata de un árbol divino según la mitología griega, ya que surgió de la tierra cuando la Diosa Atenea clavó su lanza.

BIBLIOGRAFÍA

- Allouche Y, Jiménez A, Uceda M, Aguilera MP, Gaforio JJ, Beltrán G. Triterpenic content and chemometric analysis of virgin olive oils from forty olive cultivars. *J. Agric. Food Chem.*, 57: 3604–3610. 2009.
- Composición Química de los Aceites de Oliva. Mataix J, editor. Aceite de Oliva Virgen: nuestro patrimonio alimentario. Universidad de Granada, Puleva; 2001. http://www.jccm.es/agricul/agricultura_ganaderia/sanidad_vegetal/fichas.htm
- REGLAMENTO (CE) nº 2568/ 91. Relativo a las características de los aceites de oliva y de los aceites de orujo de oliva y sobre sus métodos de análisis.

http://intereweb.mapa.es/documentos_aaoliva/NORMAS-R-2568-1991.pdf

- Uceda M, Hermoso M. La calidad del aceite de oliva. Barranco D, Fernández-Escobar R, Rallo L, eds. El cultivo del olivo. 3 ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1999.

Jesús de la Osada

Dpto. de Bioquímica y Biología
Molecular y Celular
Facultad de Veterinaria
Universidad de Zaragoza

“
**No en vano,
se trata
de un árbol
divino según
la mitología
griega, ya que
surgió de la
tierra cuando
la Diosa
Atenea clavó
su lanza.**”



LA RENOVACIÓN DEL PAISAJE

La voz *paisaje* es polisémica significando tanto el territorio, como su representación (artística, fotográfica) y la percepción del mismo. En el paisaje se integran los elementos bajo la percepción del observador, que los interpreta. El sujeto no se limita a ver; mira y lee, toma una actitud, reacciona a nivel subconsciente y analiza a nivel consciente.

Las reacciones humanas ante el paisaje natural han sido interpretadas por el ecólogo Fernando González Bernáldez (1981) como una respuesta adaptativa del hombre. Una actitud profunda que descubría riesgo o seguridad, existencia o ausencia de recursos, claves evolutivas de supervivencia en el medio natural. Una relación a la vez racional y afectiva con el entorno (González Bernáldez 1985).

POR FRANCISCO GARCÍA NOVO

El entorno nos rodea con posibilidades y riesgos que la vista debe localizar y la mente interpretar. No es un rasgo humano exclusivo, ya que vertebrados e invertebrados se guían por sus sentidos para sobrevivir, siendo capaces de interpretar el medio como un paisaje de recursos a explotar y peligros a evitar.

La observación visual de la naturaleza es superficial y limitada a formas del terreno, rocas, vegetación, aguas. Los sistemas subterráneos como el suelo, el sustrato o los acuíferos, los elementos diminutos, como los microorganismos o los que son transparentes, como los gases atmosféricos, escapan a nuestra visión. Los bucles regulatorios naturales se extienden en el tiempo y el espacio, desbordando el momento y el ámbito de la percepción del observador.

La naturaleza es mucho más amplia y diversa que la accesible en los paisajes. Cambia siempre para permanecer renovándose a todos los niveles desde la evolución biológica de las estirpes vivientes al desplazamiento de las placas litosféricas que rehacen los continentes.

Las dos acepciones de paisaje, como entidad natural y como percepción humana, corresponden a escalas diferentes. La humana es limitada en el tiempo y el espacio, y se articula sobre los sentidos. El sistema natural es percibido principalmente por la visión: sin luz, no cabe hablar de paisaje. Los aromas, los sonidos, incluso el tacto (texturas, movimiento del aire o del agua), enriquecen las sensaciones sin sustituir la visión. Por extensión se habla de paisaje en otro contexto perceptivo o de evocación (música, danza, literatura).

“La naturaleza es mucho más amplia y diversa que la accesible en los paisajes.”

También se denominan paisajes a las representaciones artísticas del territorio con sus elementos. En la mayor parte de las lenguas europeas las voces que significan paisaje, como *paesaggio*, *paysage*, *paisagem* o *landscape*, *Landschaft*, *landschap*¹, tienen su raíz en denominaciones del territorio: pais, land y originalmente se referían a la representación, a las pinturas de tema paisajista que desde los Países Bajos se difunden entre la burguesía europea. Paso a paso, la voz identificó al terreno no expresando el aprovechamiento o la forma sino la imagen perceptiva. La voz española es reciente, resultando desconocida para el Diccionario de voces españolas geográficas de 1799, aunque más tarde, por ejemplo, en el Diccionario Geográfico de España de Pascual Madoz iniciado en 1845, se emplea con frecuencia.

El observador relaciona e interpreta cuanto percibe sensorialmente del territorio desde su yo profundo, con ayuda de su experiencia en el contexto de su vida y quehacer cotidiano. Aunque el marco natural fuese invariante, la persona que lo enfrenta cambia con los años su experiencia y conocimiento, también con su cultura. Las profesiones, la familiaridad con un contexto

geográfico y sus elementos, privilegian una información sobre otras. Donde un observador ve luces, colores, ritmos, perspectivas, otro aprecia calidades de tierras de cultivo y explotaciones, o vegetación, o geomorfología y suelos, o emplazamientos arqueológicos, etc.

La información sensorial es el paso inicial. Su elaboración posterior hace jugar a recuerdos, conocimientos y sensaciones. Hay una lectura del paisaje como interpretación, un reconocimiento de elementos y tramas, lugares, procesos. Y otra

respuesta emocional donde predomina el sentir sobre el comprender. El paisaje evoca sensaciones y estados pasados y sirve como sustrato para la proyección de la persona que se “siente” en el territorio que ve, como si lo habitara, disfrutando o sintiendo su riesgo. La imagen juega este papel de conexión entre la persona y el sistema natural, que llega más lejos que el valor, la producción o la descripción técnica. El óleo o la fotografía de un trigal son más evocadores que una gavilla de trigo o un montón de grano.

Nuevas profesiones que trabajan sobre el territorio abren interpretaciones a su paisaje. Las estéticas nuevas favorecen el interés por paisajes hasta entonces minusvalorados. La sociedad revisa su catálogo paisajístico y reelabora sus actitudes artísticas ante la representación. Nuestra sociedad, dominada por los servicios, hace uso del paisaje como contexto evocador de la naturaleza que, para los habitantes de las ciudades, tiene resonancias de equilibrio y bienestar. Productos, servicios, viviendas o viajes, se promocionan insertándolos en paisajes naturales. Dando otro paso, la vida rural se presenta, en los anuncios, como una cultura cercana a la Naturaleza cuyos secretos comparte.

Las actitudes nuevas se proyectan sobre el territorio decidiendo su conservación, su restauración o construyendo una imitación urbana por medio de la jardinería. En la sociedad la valoración condiciona las actitudes y estas guían las acciones. Los paisajes apreciados atraen hacia su territorio visitantes con el de-



Benidorm, Alicante.

seo de disfrutarlos. Un modo perverso de interés rural es el intento de habitarlo, que lleva fatalmente a la destrucción del paisaje buscado. Nuestro litoral edificado es una secuela del atractivo que poseen los paisajes costeros. Y de la falta de sensibilidad hacia su conservación.

Las extensas ciudades rodeadas de áreas industriales y pasillos de comunicaciones traman el territorio con una malla urbana que atrapa el paisaje natural. En los espacios de la malla quedan manchas verdes, reduciendo el paisaje a teselas fragmentadas. La población ahora numerosa, ocupa un territorio urbanizado donde el paisaje rural antiguo y los elementos naturales adquieren valor de singularidad. La inundación urbana e industrial ha ocupado las tierras calmas del litoral y amplios espacios del interior peninsular, como el valle del Ebro, durante el último medio siglo. La topografía vigorosa ha conservado reductos de naturaleza en sierras, gargantas, macizos volcánicos o acantilados que emergen como islas naturales en un “mar” urbano o de agricultura intensiva.

El atractivo de los relictos de naturaleza, acrecentado por su singularidad, atrae a la población urbana que demanda su acceso: carreteras, aparcamientos, restauración y alojamiento,

1. *Paesaggio* (italiano), *paysage* (francés), *paisagem* (portugués), *paisatge* (catalán), *landscape* (inglés), *Landschaft* (alemán), *landschap* (holandés), *landskap* (sueco).

“
Afortunadamente, se ha desarrollado también el proceso contrario que ha servido de contrapunto a la urbanización. La creación de espacios protegidos, con casi un siglo de antigüedad en España.
”

senderos, instalaciones de esquí, embarcaderos...repiten el proceso urbanizador haciendo retroceder el frente natural.

Afortunadamente, se ha desarrollado también el proceso contrario que ha servido de contrapunto a la urbanización. La creación de espacios protegidos, con casi un siglo de antigüedad en España (Parques Nacionales de Ordesa en 1916 y de Covadonga en 1918), ha permitido proteger (Anuario 2008) cerca de 1600 espacios salvaguardando especies, comunidades y paisajes bajo muchas figuras de protección. Suman, en 2008, el 11,8% del territorio nacional, cifra cercana a la media europea del 12,7%. El interés se acentúa con los años, y los primeros parques son un buen ejemplo. Ordesa, que fue declarado con 2.100 ha, se amplió en 1982 a 15.608 ha y su denominación cambió a Parque

Nacional de Ordesa y Monte Perdido que hoy linda con el francés Parc National des Pyrénées de 45.707 ha, creado en 1967. El Parque Nacional de la Montaña de Covadonga fue declarado con 16.925 ha, ampliándose en 1995 hasta casi 65.000 ha denominándose Parque Nacional de los Picos de Europa. Doñana se inicia como Reserva Científica de 7.500 ha en 1965, pasando a Parque Nacional de 39.000 ha en 1969, a Parque Nacional con 50.720 ha, contando con Preparques en 1979 y finalmente a Parques de Doñana (Nacional y Natural) que en 2008 suman 116.500 ha de protección.

Para la sociedad española actual la conservación implica con la biodiversidad a los paisajes naturales.

LOS PAISAJES VIEJOS

Las culturas rurales, sin obedecer a diseño y sin otra protección que la propiedad, han mantenido paisajes muy atractivos y una riqueza de especies silvestres elevada frente a otros países europeos. Las consideraciones estéticas del territorio quedaban subordinadas, en la cultura tradicional, a las productivas. Los paisajes incultos, baldíos, desiertos, tenían una connotación negativa que se extendía a las playas, humedales, escarpes y crestas. Las buenas tierras bien labradas y los pastos ricos bien majadeados o segados eran considerados el paisaje atractivo, armonioso. González Bernáldez (Ruiz y González Bernáldez 1983) denomina canónicos a estos modos de explotación que una cultura rural considera óptimos y mantiene con rigor conservando su tipología de paisaje.

Francesco Petrarca, el 26 de abril de 1336, sube al Mont Ventoux *con el sólo propósito de contemplar la perspectiva* y describe la aventura desde Malucene, al pie del monte, en una carta a su amigo Dionigi da Borgo San Sepolcro. La carta se cita, con frecuencia, por paisajistas y por montañeros como evidencia primera de una

novedosa percepción sobre el territorio; la montaña, antes rechazada por su naturaleza hostil, adquiere otra significación con uno de los protagonistas del Renacimiento. Hoy las montañas congregan, anualmente, a millones de visitantes que buscan sus paisajes o las desafían en el deporte. Simbólicamente, el Tour de Francia de 2009 ha culminado una etapa² en la cima del Mt. Ventoux.

En la agricultura tradicional, el autoconsumo potenciaba la diversidad de producciones y la subdivisión en el ruedo de los pueblos en parcelitas diminutas. La ordenación espacial seguía un modelo radial, situado cercanos a los cultivos de primor, como los huertos, algo alejados la viña, olivar y labor y más allá, los pastizales, matorral y arbolado. Las viviendas eran pequeñas y las vías de comunicación precarias. La población rural aprovechaba los recursos que su tecnología le permitía, apoyándose en animales de tiro y de carga, en los rebaños y en la cría doméstica de cerdos y aves. En 1950, para una población peninsular de 28M de habitantes, las cabezas de ganado (sin las aves) sumaban 29,5M, dominadas por los ovinos (16M) con 3M de equinos. Actualmente (2009), para 46M de residentes, el censo ganadero es de unos 56M, dominados por el porcino seguido del ovino sumando entrambos unos 30M, apenas medio millón de equinos y otros 50M de aves. El uso de animales de tiro es casi inexistente. La cría de aves, porcino y bo-

vino se hace de preferencia estabulada e incluso caprino y ovino reciben piensos, paja, complementos y disponen de establos, parideras, etc. Las antiguas cuadras, gallineros y cochiqueras han dejado de existir.

El medio rural estaba sometido a una presión intensa modulando suelos, aguas de superficie y acuíferos y condicionando a las poblaciones animales, vegetales y a sus comunidades. El resultado era un paisaje sostenible, diverso y moderadamente productivo, donde alternaban los años de abundancia con los de penuria.

Los paisajes rurales de mediados del siglo XX variaban mucho entre regiones y climas, entre montañas, llanuras o litoral o con las culturas rurales. Pese a la diversidad, compartían algunas pautas comunes que contrastan con el estado actual.

En primer lugar, los campos de cultivo, las dehesas y pastizales, también los praderíos, daban sensación de orden. Caminos con poca maleza, prados segados hasta los muros, regatos y cercas bien mantenidos para conducir el riego. Sotos entresacados, dehesas sin matorral, sin gamones ni especies vivaces, con las encinas y

2. Etapa 20ª, 25 de Julio de 2009.



alcornoques entresacados, cruzados y podados regularmente para bellota. Bosques limpios de matorral y sin leña caída ni árboles muertos. Fuentes y pozos limpios, con abrevaderos; senderos, cordeles y cañadas casi rasos y en las eras un pasto corto, efímero. Carreteras con árboles en ambos lados y cunetas con hierba, a veces zarzas o helechos, que combatía el caminero.

No es una descripción de paisaje sino algunos rasgos rurales comunes, con innumerables excepciones. Una suerte abandonada se cubría de maleza o la cerca se desmoronaba. En las terrazas se producían desplomes del muro. En la montaña, o con climas húmedos, bastaban unos meses sin tránsito para que helechos, tojos, zarzas o escobas ocupasen el camino. Pero una mano diligente los recortaba para combustible o cama de ganado, o algunas cabezas de ganado, llevadas por un niño, aprovechaban esta vegetación de rápido crecimiento. El propietario rehacía cercas y podaba setos para evitar intrusiones y las terrazas se rehacían conjurando la erosión. Pozos, fuentes y pilones se limpiaban periódicamente. El paisaje rural se mantenía.

No se intentaba la conservación sino la máxima explotación... limitada por el bajo perfil tecnológico. Los niños buscaban nidos, se consumían sus huevos y pollos y se cazaba para casi cualquier ave. A las piezas de caza menor se añadían ratas de agua, lagartos, culebras, tortugas, galápagos, ranas, cangrejos de río. Los peces fluviales se capturaban a mano, con caña, con red o enverbasando con plantas venenosas los arroyos pequeños. Los animales de pelo se perseguían por las pieles, con un activo comercio. En las casas rurales era frecuente ver pieles estiradas de conejos, de jinetas, turones, nutrias, etc, que periódicamente recogía un peletero. Había batidas de lobos y la administración pagaba una recompensa por cada par de patas de rapaz o por la cola del zorro.

Soportando la presión, y gracias a la baja densidad humana, los paisajes rurales mantenían una biodiversidad alta. El movimiento de rebaños y animales de labor permitía un intenso transporte de semillas que favorecía elevadas diversidades de plantas (y animales) en pastizales y dehesas y en la red de caminos y veredas, facilitando la conectividad ecológica. Los montones de leña, los estercoleros, los muladares con

los animales muertos, los árboles viejos con agujeros y el tronco hueco ofrecían recursos y escondrijos a la fauna. Además, los cercados y setos o las paredes de piedra sin revoco exterior en las viviendas y los tejados con teja romana multiplicaban los refugios.

El bajo consumo de agua y la ausencia de alcantarillado evitaban la contaminación urbana de las aguas de superficie y no se ver-

“ El bajo consumo de agua y la ausencia de alcantarillado evitaban la contaminación urbana de las aguas de superficie y no se vertían los purines del ganado. ”

tían los purines del ganado. Ciertas actividades resultaban agresivas localmente como la pudrición de lino para librar la fibra, el lavado de tripas en las matanzas o el lavado de lana en los batanes. Pequeños azudes y caceras de los molinos hidráulicos (harineros, batanes, telares, forjas) modificaban algo la continuidad fluvial. La derivación de caudales para riego, durante el verano, representaba otra modificación, acentuando el estiaje. Núcleos mayores de población, con alcantarillado o con industrias de queso, lagares, prensas de aceite, representaban focos contaminantes de vertidos urbanos, sueros, vinazas y alpechines. Sus consecuencias sanitarias podían ser serias aguas abajo y las ecológicas eran dependientes del caudal fluvial.

Los humedales abundaban, desde los pantanos y aguazales a las charcas temporales, con una proliferación extraordinaria de vida acuática. Atractiva en aves, peces, anfibios, en vegetación y paisajes. Negativa para la población, que sufría el acoso de los mosquitos y la transmisión de la malaria.

Los procesos sociales, de creciente intensidad en el S XX, han ido separando a la naturaleza de sus actores, al paisaje rural de quienes

llevaban a cabo su regulación. La separación ha sido material y cultural. El paso del mundo rural a la vida urbana lo es hacia la tecnificación. La ciudad es un medio artificial, donde los elementos naturales poseen carácter auxiliar, subordinado. Es un medio seguro frente a la naturaleza, predecible y confortable, donde abrigo y alimento dependen apenas del clima. Los paisajes naturales quedan en la distancia y su valoración estética pesa más que la productiva.

LOS MOTORES DE LOS PAISAJES NUEVOS: EMIGRACIÓN, ABANDONO, TECNIFICACIÓN

Los cambios de la población rural han desencadenado otros en la explotación local de los recursos y, en consecuencia, la transformación del paisaje rural. El paisaje rural se estructura con la entrada de población y se difumina con el descenso demográfico. La inmigración intensifica el uso, fragmenta el espacio, diversifica las explotaciones y amplía la red de vías y senderos; la emigración fomenta el abandono, la uniformidad, reduce la diversidad de usos y provoca la pérdida de algunos caminos y veredas, a veces, de los núcleos pequeños urbanos (Gascó *et al.* 2005).

Algunas intervenciones son dominantes sobre el paisaje, su funcionamiento y su percepción. Ejemplo son la tala y el aclareo del arbolado, la roza del matorral, la puesta en cultivo, la plantación de árboles o el trazado de vías de comunicación. De mayor alcance son el drenaje de un humedal, la construcción de una presa que permite inundar un valle, la creación de un núcleo urbano o la apertura de una mina. Un incendio produce la mutación del paisaje, que puede hacerse perdurando causando la sustitución de una cubierta vegetal por otra, de un uso por otro alternativo.



La renovación del paisaje

Las intervenciones activas tienen su correlato en las pasivas donde el cambio viene causado por el cese de una actividad largo tiempo mantenida. El abandono permite que las regulaciones naturales, antes bloqueadas, se desencadenen y puedan generar un paisaje distinto.

Ejemplo común es la retirada del ganado de praderíos y pastizales que permite la sucesión secundaria siendo

los pastos invadidos por bienales, perennes herbáceas y más tarde por leñosas que cierran las perspectivas y reducen la diversidad ecológica local. El abandono de los cultivos favorece la entrada de especies herbáceas que darán paso a matorrales. Pastos y cultivos abandonados cambian tanto la percepción paisajística como el funcionamiento ecológico. Se abate la diversidad faunística y florística, se acumula biomasa y necromasa que suelen incrementar riesgo de incendio.

Si las condiciones fueran apropiadas, el bosque puede extenderse a expensas del matorral, y el paisaje abierto de pastizales o cultivos desemboca en otro forestal, cerrado.

Cambios como los descritos simplifican el paisaje haciéndolo más uniforme, porque las pequeñas variantes entre parcelas de cultivo o suertes de pastos dejan de percibirse; las veredas o las cercas y setos quedan borradas. La diversidad local ecológica y perceptiva se pierde durante el cambio paisajístico inducido con el abandono. No obstante, las nuevas condiciones pueden resultar más favorables para la conservación de los suelos, para la infiltración o para la fauna vertebrada. De hecho, en la gestión de los espacios naturales protegidos, con frecuencia, se ha favorecido el abandono.

Los sistemas naturales son tan variados que, durante su abandono, la regulación natural puede conducirlos por trayectorias desfavorables al paisaje rural. Los regadíos y el riego de praderías, también los molinos hidráulicos, los canales y regatos mantenían una vegetación densa de especies hidrófilas flotantes o emer-

gentes. La galería de arbustos y arbolado suele llevar sauces, zaragateras, álamos y chopos, fresnos, etc. Al menguar el caudal del canal, bajo climas mediterráneos, la cubierta vegetal de la ribera se reduce o desaparece; lo que constituía un paisaje intersticial frondoso, siguiendo la línea de agua, se convierte en un matorral de menor porte donde el arbolado puede desaparecer. Si el caudal cesa por completo, la vegetación hidrófila se extingue y su paisaje intersticial se borra.

En suelos pendientes de mal drenaje interno, el abandono puede favorecer la erosión. Su evolución depende de litología y morfología locales, pero pueden crearse cárcavas que añaden a la erosión vertical los deslizamientos y procesos de remoción en masa con profundos efectos en el paisaje, en los recursos y en los sistemas naturales.

Las canteras sin explotación suelen revegetarse, pero en las minas es frecuente que las escombreras y galerías se conviertan en fuentes permanentes de vertidos contaminantes y la roca extraída, en muchos lugares, no puede ser recolonizada debido a su acidez o toxicidad. El río Tinto evidencia que el proceso contaminante puede prolongarse durante siglos hasta crear un paisaje casi extraterrestre. El caudal, siempre ácido y rico en iones metálicos, ofrece un medio poco favorable para los organismos acuáticos.

La dirección opuesta al abandono es la tecnificación del territorio que alcanza a todos sus recursos. La ganadería se estabula y se levantan naves destinadas a granjas de pollos, establos y parideras, edificios auxiliares, harvestores, rampas de carga, cancelas y cercados metálicos, cercas eléctricas. Pistas de acceso, líneas eléctricas o depósitos de propano, etc. Pacas y balas de paja se apilan en el exterior y es frecuente encontrar acumulaciones de estiércol y camas de ganado. El uso de antibióticos y aditivos a la digestión del ganado vacuno dificulta el ataque microbiano de las bostas y su desintegración por la fauna descomponedora, acumulándose en superficie sobre los pastizales. El propio

ganado seleccionado ofrece poca diversidad de capas o razas y han desaparecido las razas de trabajo. La variedad de animales, característica de la vida rural, se ha reducido radicalmente y faltan los caballos, mulos, burdéganos y asnos. Las yuntas de bueyes han cedido su lugar a los tractores. Apenas hay gallinas o palomas, cabras u ovejas en los núcleos rurales.

En España se han superpuesto en los últimos 50 años, varios procesos de uso del suelo con resultado contrapuestos. La superficie agrícola se ha mantenido durante el S XX en el intervalo 25-20M de ha. Desde 1990 a 2007 ha pasado de 20 a 17M ha y la forestal de 15,8 a 18M ha, aunque la expansión forestal procede, en general, de antiguos pastizales y matorrales. El paisaje agrario abandonado sin nuevo uso puede suponer un 20% durante el siglo pasado. La tecnificación alcanza prácticamente al resto, aunque esto ha implicado el paso de suelo agrícola a industria agropecuaria e infraestructuras. El paisaje rural se urbaniza y tecnifica en las zonas favorables. En las abandonadas, se naturaliza por el abandono y por la significativa expansión forestal.

Los espacios generados por la agricultura han ofrecido paisajes inolvidables: la extensión dorada de los trigales, ondulándose bajo el viento o pintados de amapolas; los campos de algodón cuajados de co-

“ El paisaje rural se urbaniza y tecnifica en las zonas favorables. En las abandonadas, se naturaliza. ”

pos blancos; los girasoles con su enorme cabeza amarilla orientada a levante; los campos de azafrán como una alfombra de flores moradas; los cultivos de tomates o pimientos con frutos lustrosos; los campos de colza o alfalfa en flor, como un recuadro de color. Renoir, Cézanne, Gauguin, Benjamín Palencia y tantos otros han tratado de representar la vibración de la luz en los paisajes tradicionales. Millet recogía el mundo rural con sus habitantes. Van Gogh, en su frenético recorrido, ha explorado los colores y ritmos de los paisajes rurales. En una obra cargada de simbolismo (Arlés, 1888³) representa un primer plano rural de siega con los segadores en una mies dorada. Al fondo, en el horizonte, se elevan sobre las casas las chimeneas, en una gama gris y azulada, síntesis de la vida industrial en desarrollo. Como frontera entre los dos paisajes, avanza el ferrocarril de vapor, símbolo y motor del cambio.

La tecnificación agrícola ha sido más impactante que la ganadera para la producción y la percepción. Las máquinas (cosechadoras, tractores, remolques, camiones) han incrementado la productividad que se ha multiplicado con el uso amplio de fertilizantes y agroquímicos, semillas seleccionadas y, paulatinamente, de transgénicos. La potencia disponible ha permitido subsolar, labrar suelos fuertes, remodelar superficies y desmontar el matorral, terraplenar los arroyos y drenar las zonas encharcadas. Las ventajas de la maquinaria potente para labrar grandes superficies ha impulsado "correr lindes", concentrar las propiedades en unidades extensas de explotación uniforme.

Con las lindes, se derriban cercados y setos, se pierden los viales estre-

chos, cordeles y senderos, los sesteaderos de ganado y los árboles que servían de marcos para las propiedades y de reparo para los segadores. La uniformidad productiva ha borrado la memoria cultural del territorio. Comparados con los viejos, los paisajes nuevos son simples, homogéneos, continuos, carentes de textura. El colapso de elementos culturales ha ido paralelo al de funciones ecológicas. Desaparecidos los setos vivos y los cercados, no quedan guaridas ni refugios para gran parte de la fauna y la flora que secularmente había sobrevivido en el viejo paisaje intersticial de las lindes. La diversidad biológica está en crisis a escala europea (*European Biodiversity 2005*).

La incorporación de los plásticos agrícolas ha causado otra revolución paisajística. Los nuevos materiales sobre los suelos, cubriendo los caballones o creando invernaderos, han permitido una simplificación ecológica radical, eliminando casi por completo la diversidad de especies adventicias en los cultivos y con ella la fauna animal asociada. En el suelo recubierto de lámina de plástico, la elevada temperatura crea condiciones extremas para la flora y la fauna silvestre que son eliminadas; en el invernadero, se consigue su control con agroquímicos. El invernadero es una burbuja tecnológica aislada de la bios-



Las Espigadoras, Millet.

Flor de cerezo en el Valle de Jerte.



fera. La producción forzada demanda insumos grandes y agua para surtir al mercado de frutas y hortalizas. Los voluminosos residuos de cosecha, los excedentes no comercializados, los fallos de producción, representan la otra cara del cultivo bajo plástico y encuentran su destino en los vertederos locales.

La nueva agricultura tecnológica, en su máximo desarrollo, extiende sobre el territorio una cubierta plástica apenas interrumpida por los viales. Una superficie brillante que, de lejos, simula un lago. Desde la Estación Espacial los astronautas ven a simple vista, en el SE de la Península ibérica, el lago de plástico que cubre El Ejido en Almería. Representa un gran yacimiento de trabajo y poderoso motor económico. Y un paisaje inédito.

Los invernaderos implican otras innovaciones, como la aparición de vertederos de plásticos y envases de agroquímicos, los almacenes, cámaras, naves de envasado y envío, tendidos eléctricos, viario y residencias para la abundante mano de obra de temporeros que acuden en el periodo de cosecha.

Sin alcanzar la intensidad del invernadero, la agricultura ha tecnificado cualquier cultivo leñoso: los frutales se han hecho de pequeño porte y se podan en espaldera. Los olivos en marcos densos, con árboles pequeños y regadío por goteo, labrando poco o nada. El nuevo viñedo presenta una red de cables y soportes; los frutales adquieren formas geométricas o se apoyan en empalizadas metálicas con una figura bidimensional; los naranjos, densos y pequeños, para ser recogidos con máquina.

Los paisajes agrícolas viejos llevaban algunos frutales en los ruedos; añadían la diversidad del vuelo de las copas a los vivos colores en los cultivos del suelo. Algunos pies eran grandes: ciruelos, cerezos, manzanos, perales, higueras o naranjos de 5 ó 6 m, que cargados de fruta, parecían la imagen de la abundancia. Los cul-

tivos de manzanos, perales, naranjos o frutos de hueso, eran regulares, pero no estrictamente geométricos; árboles mayores y pequeños, algunos con más ramas o la cruz más alta; en flor ofrecían un magnífico paisaje visual. En los paisajes tecnológicos, los planteles de melocotoneros y albaricoqueros, cuando florecen, crean grandes extensiones rosadas y blancas, pero sumamente geométricas, artificiosas.

Hay que disfrutar, mientras perduren, de los paisajes viejos. Frutales en flor en parcelas escalonadas sobre una topografía vigorosa; los almendros en Málaga y Granada, los bellísimos cerezos del valle del Jerte, las pomaradas de Asturias y Cantabria, los pasmosos viñedos de Lanzarote donde cada cepa ocupa un pequeño embudo excavado en el picón. Galicia y, con menor intensidad, la cornisa cantábrica hasta Navarra ofrecen un paisaje tradicional de sorprendente diversidad, con cultivos anuales, frutales, pinar y eucaliptal y un urbanismo disperso

3. Óleo sobre lienzo, F545, del catálogo de Jacob Baart de la Faille de 1920. Durante el verano de 1888 volvió Vincent sobre el tema en varias obras en óleo y tinta china jugando con las chimeneas y el perfil urbano de Arlés y con las gavillas de trigo.

que todavía no ha cambiado el carácter rural del paisaje. El equilibrio es precario, bastando un cambio pequeño de normativa para inclinar la balanza hacia el abandono o la tecnificación. La trama urbana de Córdoba, más la de Sevilla, incorpora en sus calles a los naranjos en una atractiva fusión: hojas perennes, verdes y lustrosas, en primavera el azahar que perfuma las calles e inicia las naranjas agrias que adornan las copas hasta el verano cuando finalmente se cosechan con destino al mercado londinense para preparar confitura. Sabores y aromas, sombra y colores naturales estimulan los sentidos en las ciudades andaluzas que completan con los patios, abiertos a la contemplación, la sutil elaboración del verde urbano.

El paisaje tecnológico ha alcanzado una dimensión inédita, y su percepción es radicalmente diferente a cualquier otro entorno, agrícola o urbano. La marea tecnológica, personalizada en los invernaderos, ha irradiado desde las tierras bajas de Almería. Las regiones agrícolas tradicionales han implantado invernaderos y progresivamente lo han hecho las restantes. La expansión industrial, urbana y de los servicios, superpuesta a la agricultura intensiva y al abandono rural, construyen el territorio de la próxima generación, un canon inédito (García Novo 2008) para un paisaje móvil cuyos protagonistas: la naturaleza y la población recreando el territorio, el observador percibiéndolo, están sujetos a cambio.

La cultura tecnológica explota los recursos de forma nueva abandonando las prácticas antiguas; los elementos naturales no intervenidos son incorporados a la producción gracias a nueva tecnología; los elementos antiguos son abandonados y reintegrados a la regulación natural.

La cultura urbana, confinada en su trama artificial, toma interés en el territorio rural que, a sus ojos, aparece como natural, favoreciendo la protección. Sucesivas

modas han iluminado con nueva percepción los paisajes naturales, mostrando atractivo lo que antes era hostil, improductivo o peligroso. Playas y dunas, acantilados y rompientes, cumbres nevadas, barrancos y gargantas, son paisajes de atracción; las marismas, paradigma de peligro y riesgo, se privilegian en la protección: la ciénaga a desecar se reinterpreta como biodiversidad y humedal a proteger. Los Arribes del Duero, la Garganta del Cares, la Hoz del Duratón, los rápidos del Gállego y tantos otros valles de paredes escarpadas y curso torrencial en Pirineos atraen



“
La cultura tecnológica explota los recursos de forma nueva abandonando las prácticas antiguas.
”

miles de visitantes que buscan, en el paisaje agreste, una poderosa impronta natural.

A estos motores, el cambio de población y asentamientos, el de usos y el cambio de percepción, hay que añadir el cambio climático.

El clima se ha modificado al hacerlo la química del aire y con ella los balances térmicos de la atmósfera, desde los años 70 del siglo XX, con un ascenso global medio de temperatura de 0,7°C en los 40 años transcurridos (IPCC, IV Informe, 2008). Los efectos son regionalmente distintos y se superponen como pequeños cambios a la variable meteorología natural. Separar la tendencia general de la variabilidad anual resulta un desafío científico de primer nivel. No obstante, se han confirmado cambios consistentes de precipitación y temperatura en todas las latitudes que apuntan a modificaciones ambientales con efectos ecológicos perdurantes. El nivel altitudinal del arbolado y el de especies herbáceas, insectos, aves y otros vertebrados está cambiando en respuesta al clima. También se han documentado procesos microevolutivos con cambio en la frecuencia de alelos y de la abundancia de unas estirpes sobre otras. Salvo efectos muy patentes, como la línea del arbolado en las cumbres, los impactos paisajísticos son leves ahora, aunque se multiplicarán en el futuro.

Los cambios de precipitación, o del balance hídrico de las cuencas, tendrán efecto más patente en la vegetación asociada a los cauces y los paisajes intersticiales fluviales.

Un componente secundario del cambio global es la introducción de especies silvestres, causadas por el comercio de productos agrícolas y de jardinería y secundariamente por el tráfico y movimiento de materiales, a los que se superponen efectos accidentales. Afecta a microorganismos, animales y plantas acuáticos y terrestres. Una reciente evaluación a escala europea (Proyecto DAISIE, *Delivering Alien Invasive Species In-*

ventories for Europe, 2009) estima en 12000 las especies introducidas en Europa.

Los impactos causados en la agricultura por las plagas o introducciones raramente se elevan a escala de paisaje. Sólo cuando una especie dominante desaparece, podría percibirse el efecto. En nuestros paisajes han sucedido, en los últimos 50 años, algunas mutaciones causadas por introducciones como la grafiosis del olmo, la tinta del castaño y, actualmente, la seca de encinas y alcornoques que, en cada caso, eliminaron miles de pies alterando los paisajes forestales.

El papel de las invasiones se percibe cuando un elemento vistoso se hace abundante en el paisaje. Durante el S XVIII se introdujo en la península el ailanto (*Ailanthus altissima*) como cultivo industrial para la producción de tusá, una variedad de seda. El árbol fue plantado en jardines y carreteras, encontrándose incorporado como subespontáneo, siendo capaz de crear masas locales. Algunas especies de eucaliptos (como *Eucalyptus globulus* en climas húmedos), o de acacias (como *Acacia dealbata*, *A. melanoxylon*) y otros árboles como la *Robinia pseudoacacia*, se pueden expandir formando manchas en la vegetación que modifican el paisaje. Los *Oxalis* de jardinería, procedentes de Sudáfrica, se han convertido en adventicias sobre la cuenca mediterránea. Su efecto paisajístico es vigoroso cuando en invierno cubren los campos de flores amarillas (*Oxalis pes caprae*) o rosadas. En la península se ha extendido, durante los últimos 20 años, el plumero de la Pampa (*Cortaderia selloana*), especie agresiva que compite con la flora autóctona en áreas sensibles como los campos de dunas. Usada con profusión en jardinería, puede llegar a implantarse creando facies paisajísticas donde predominen sus plumeros, un inédito paisaje vegetal evocando la Pampa argentina de origen.

Son una pequeña muestra de alteraciones biológicas en los paisajes a las que se añadirán incesantemente otras. Microorganismos, animales y plantas ensayan nuevas áreas en los continentes

La renovación del paisaje

donde la actividad humana las ha incorporado. Especies autóctonas encuentran imposibles las nuevas condiciones del territorio y se extinguen de sus áreas históricas. Con el cambio de siglo, los pobladores del medio rural tradicional que modelaron el paisaje antiguo desaparecen y, con ellos, se desvanecen los paisajes que forjaron. El paisaje se rehace cada día en sus elementos, en su funcionamiento y su percepción. Constituye el marco de nuestra actividad en la ciudad y el territorio, en el recreo y el trabajo. Es una fuente constante de sugerencias sensoriales y una evocación de respuestas que alcanza los niveles profundos de nuestra personalidad. Refleja las actividades de nuestra población y es el telón de nuestra historia individual y colectiva.

La sociedad recrea su cultura y cada década mira con ojos nuevos su territorio, dispuesta a tecnificar, abandonar o proteger. Pero es cada individuo, desde su legado personal, quien percibe por los sentidos esa síntesis del entorno y la interpreta. Paisaje como percepción, paisaje como territorio, paisaje como representación. Y en una sociedad democrática participativa, paisaje como decisión colectiva.

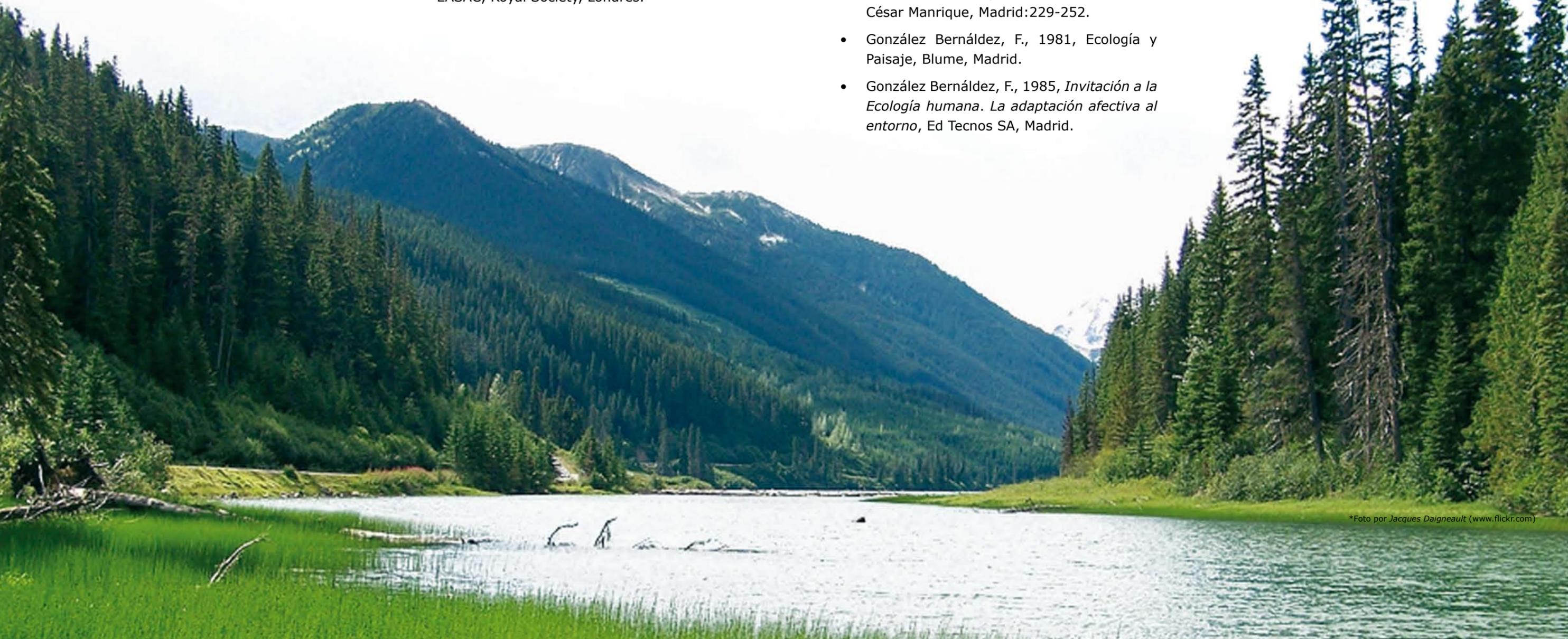
BIBLIOGRAFÍA

- *Anuario 2007, 2008*, Europarc-España Fundación BBVA. Madrid.
- *European Biodiversity Policy Report, 2005*, EASAC, Royal Society, Londres.
- García Novo, F., 1999, Los paisajes transitorios. El futuro de los paisajes tradicionales en una sociedad urbana. *Homenaje a D. Angel Ramos (1926-1998)*. Real Academia de Ciencias y ETSI Montes Madrid I:601-628.
- García Novo, F., 2008, Los paisajes europeos en una cultura tecnológica. *El paisaje mediterráneo. Opciones de multifuncionalidad*. Cuadernos de Sostenibilidad. Fundación Santander Central Hispano. Santander: 22-39.
- Gascó, J. M., Naredo, J. M. y Parra, F., 2002 Sistema rural La modernización de la agricultura española y sus repercusiones ecológicas Naredo, J. M. y Parra F., eds, *Situación diferencial de los recursos naturales españoles*, Economía y Naturaleza. Fundación César Manrique, Madrid:229-252.
- González Bernáldez, F., 1981, *Ecología y Paisaje*, Blume, Madrid.
- González Bernáldez, F., 1985, *Invitación a la Ecología humana. La adaptación afectiva al entorno*, Ed Tecnos SA, Madrid.

- Ruiz, J.P. y González Bernáldez, F., 1983, Landscape perception by its traditional users The ideal landscape of Madrid livestock ri-sers. *Landscape Planning* 9:279-297.

Francisco García Novo

Facultad de Biología
Dpto. Biología Vegetal y Ecología
Universidad de Sevilla
fgnovo@us.es



*Foto por Jacques Daigneault (www.flickr.com)

Hace cuatrocientos años, Galileo fue el primero en observar el cielo con un telescopio revolucionando la astronomía. Hace aproximadamente cien años, el descubrimiento de los rayos cósmicos marcó el comienzo de una nueva era para la Astrofísica. Desde entonces, nuevos "mensajeros", las astropartículas, han permitido explorar el Universo de una forma diferente a la que permite la astronomía convencional. Por eso, los investigadores europeos, que trabajan en el estudio de las Astropartículas, se suman a la celebración del año internacional de la Astronomía. Del 10 al 17 de octubre de 2009, se ha celebrado la primera semana europea de la Física de Astropartículas, una iniciativa de las redes europeas ApPEC y ASPERA, organizándose más de 50 eventos a lo largo y ancho de Europa. Entre los actos programados hay que destacar, por ejemplo, la conversión de la torre de Montparnasse de París en un detector de rayos cósmicos o la exposición "Astros y partículas. Las palabras del Universo" en el *Palazzo delle Esposizioni* de Roma.

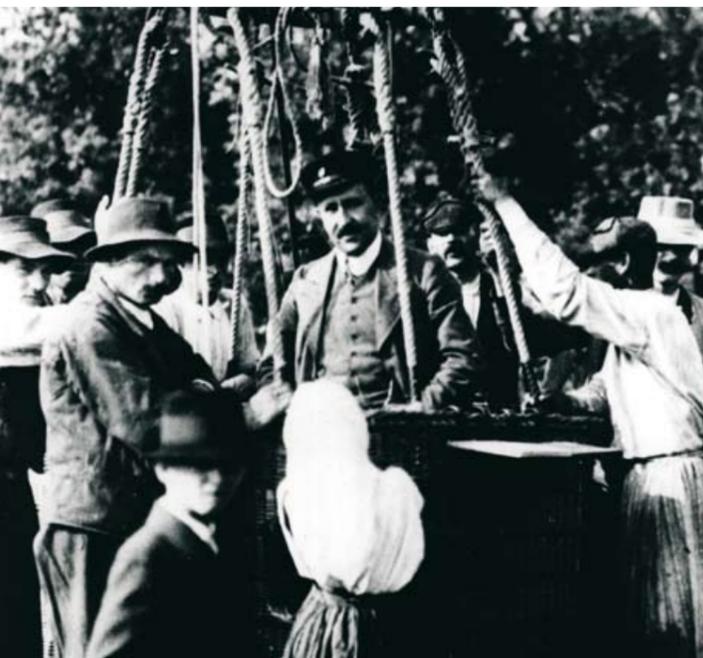
Las actividades que se realizan en España, dentro de la Semana Europea de las Astropartículas, las coordina la Red Nacional Temática en Astropartículas (RENATA) y se puede consultar la información, correspondiente a las mismas, en la web: <http://www.astroparticle.org>. En Zaragoza, en particular, miembros del grupo de Física Nuclear y Astropartículas han organizado las siguientes actividades (con la colaboración de la Facultad de Ciencias y el patrocinio de

Telescopio MAGIC (La Palma): una instalación singular dedicada a la detección de rayos gamma.

*Foto por MAGIC Collaboration.

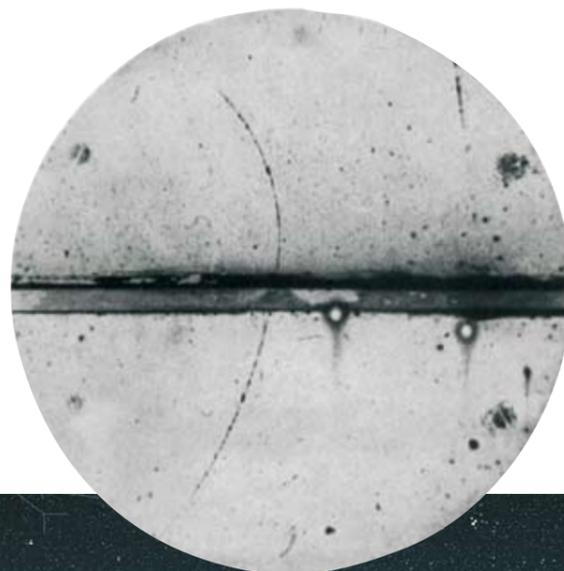


LA MAGIA DE LAS ASTROPARTÍCULAS
POR CLARA CUESTA, CARLOS POBES Y MARÍA LUISA SARSA



ARRIBA: en 1912, Víctor Hess ascendió 5200m en un globo y demostró la existencia de radiación proveniente del espacio exterior, los rayos cósmicos. Recibió el Premio Nobel de Física en 1936 por este descubrimiento.

FECYT, el Vicerrectorado de Proyección Social y Cultural de la Universidad de Zaragoza y el Laboratorio Subterráneo de Canfranc): exposición de pósteres informativos sobre diversas facetas de la Física de Astropartículas (en el Pabellón de la Ciencia-Feria de Zaragoza y Facultad de Ciencias), organización de un maratón de conferencias que, a nivel divulgativo, presentaron la Física de Astropartículas a los estudiantes de la Facultad de Ciencias y público en general (días 20 y 21 de octubre en el Aula Magna de la Facultad de Ciencias) y un espectáculo de magia realizado por estudiantes de la Facultad de Ciencias.



ARRIBA: el estudio de los rayos cósmicos puso de manifiesto la existencia de nuevas partículas y, en particular, de la antimateria. Foto de la detección en una cámara de niebla de la traza dejada por un positrón (antipartícula del electrón). Anderson recibió el premio Nobel en 1936 por su descubrimiento. Foto tomada de C.D. Anderson, Phys. Rev. 43, 491 (1933).

FONDO: representación artística del desarrollo de una cascada de rayos cósmicos originada por un primario de muy alta energía. Los aceleradores más potentes no son capaces de producir las energías que se observan en los rayos cósmicos.

OTRA FORMA DE MIRAR EL UNIVERSO

Los físicos de astropartículas han abierto nuevas ventanas al Universo utilizando, para ello, mensajeros diferentes de los utilizados por la astronomía convencional. Gracias a ellos, se pueden investigar cuestiones fundamentales en la frontera de la Astrofísica, la Cosmología y la Física de Partículas como qué es la materia oscura, cuál es el origen de los rayos cósmicos de más alta energía o la naturaleza de la gravedad.

España posee dos instalaciones singulares dedicadas a las astropartículas y que están reconocidas internacionalmente: el experimento MAGIC, detector de rayos gamma en el Roque de los Muchachos (Isla de La Palma), y el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, en el Pirineo aragonés, donde se llevan a cabo experimentos de detección de materia oscura y de física de neutrinos. También existen grupos de investigación españoles en grandes experimentos internacionales como AMS02, ANTARES, AUGER, CHOOZ, CAST, DES, LIGO, etc.

Clara Cuesta, Carlos Pobes y María Luisa Sarsa

Grupo de Física Nuclear y Astropartículas Facultad de Ciencias Universidad de Zaragoza



LOS MUONES SOBRE PARÍS

En París, durante la semana de las astropartículas, se ha podido disfrutar del espectáculo denominado por los organizadores "Ópera Cósmica". En el mismo, cada vez que un muón atraviesa alguno de los detectores de partículas instalados en la azotea de la torre Montparnasse (210 m de altura, a la derecha en la foto), un pulso de luz láser destella en el cielo parisino con origen en el Observatorio de París. El objetivo es aproximar las partículas de origen cósmico al público y al mismo tiempo recordar un experimento pionero en el campo que en 1910 realizó en lo alto de la Torre Eiffel un físico alemán: Theodor Wulf.

LA MAGIA DE LAS ASTROPARTÍCULAS EN ZARAGOZA

Una de las actividades propuestas por el grupo de Zaragoza ha sido el espectáculo "La Magia de las Astropartículas" en el que han participado dos estudiantes de la Facultad de Ciencias. En el espectáculo se propone un viaje sorprendente por el mundo de las astropartículas que, presentadas en una breve introducción, son las protagonistas de efectos sorprendentes: rayos cósmicos que se recogen en un 'jarrón muónico', neutrinos que viajan y cambian mágicamente su naturaleza o son 'cazados' en un improvisado Laboratorio Subterráneo de Canfranc, materia oscura que hace levitar mágicamente algunos objetos, etc. En definitiva, un recorrido por las mágicas propiedades de las astropartículas, gracias a las cuales estamos descubriendo un Universo fascinante.

El espectáculo no sólo se ha presentado en Zaragoza (Pabellón de la Ciencia - Feria de Zaragoza y Facultad de Ciencias), sino que ha viajado también a Tenerife (Museo de las Ciencias y el Cosmos) y a Alcalá de Henares (Museo Arqueológico). Fernando Gomollón y Adrián Coso han sido los estudiantes que, junto con Carlos Pobes, han tratado de dar a conocer el mundo de las astropartículas de esta singular forma. Fernando es estudiante de 4º de Químicas y entre sus muchas aficiones figuran la magia y la Ciencia. Es responsable del blog <http://www.electronesexcitados.com> sobre divulgación científica. Adrián es estudiante de 4º de Físicas y su pasión por la magia le ha llevado a formar parte del 'Funny Magic Creepy Show'.

PLANETAS Y EXOPLANETAS II

Como ya dijimos en nuestra anterior entrega, se han ido descubriendo nuevos objetos que orbitan alrededor del Sol, pero el Sol no es sino una estrella, por lo que, en principio, podría pensarse que, puesto que hay miles de millones de estrellas, muchas de ellas podrían tener sistemas planetarios. Sin embargo, la búsqueda no iba a ser fácil, puesto que si se habían necesitado siglos y avances tecnológicos en instrumentación para descubrir nuevos objetos transneptunianos debido a lo alejados que se encuentran de la Tierra (y recordemos que están dentro del sistema solar) el descubrirlos en otras estrellas parecía misión imposible. Recordemos que la estrella más cercana, próxima-Centauro, se encuentra a unos 2 años-luz del Sol. Lógicamente, para descubrir estos planetas (si existiesen) habría que emplear técnicas indirectas, y no observación directa.

A lo largo del siglo XX, hubo varios anuncios de descubrimientos de exoplanetas, si bien, el primer caso confirmado fue el de Wolszczan y Fraïñ en 1992, quienes con el radiotelescopio de Arecibo en Puerto Rico descubrieron planetas alrededor del púlsar PSR 1257+12. Un púlsar es el objeto resultante de la explosión de una supernova. Se trata de un objeto que contiene gran parte de la masa inicial de la estrella, pero en el que la masa está degenerada, pues la explosión se ha producido por el colapso gravitatorio que ha superado a la energía radiada por reacciones nucleares. El remanente de esta supernova se conoce como estrella de neutrones. Una estrella de neutrones tiene una masa entre 1.3 y 21 veces la masa solar, pero tiene un radio de tan solo 12 km.

POR ANTONIO ELIPE

Debido a las leyes de conservación del momento angular, un objeto tan denso tiene que girar muy rápido, varias veces por segundo. Debido a que los polos magnéticos no coinciden con el eje de rotación, la estrella emite pulsos debido a la aceleración de la materia cerca de los polos magnéticos. Cuando se detectan estos pulsos (mediante radioastronomía) la estrella se conoce como púlsar. Pues bien, los planetas descubiertos por Wolszczan se cree que corresponden a restos de la explosión de la supernova que no fueron destruidos y siguen orbitando, caso que se estima muy poco frecuente, aunque posteriormente se han detectado una media docena de planetas alrededor de púlsares. Las pequeñas variaciones detectadas en la frecuencia de los pulsos eran originadas por los exoplanetas.

En 1995, Mayor y Queloz, de la Universidad de Ginebra, anunciaron la primera detección de un exoplaneta alrededor de la estrella 51 Pegasi, una estrella de la secuencia principal, es decir, una estrella normal, lo que abrió una nueva línea de investigación en Astronomía. En efecto, a partir de este descubrimiento, se han mejorado notablemente las técnicas e instrumentos de espectroscopía, lo que ha permitido la detección de un elevado número de sistemas planetarios en otras estrellas.

Dadas las distancias a que se encuentran las estrellas de nosotros, y puesto que los planetas reflejan la luz de su estrella madre, su brillo es generalmente mucho menor, menos de una millonésima que la estrella, por lo que difícilmente puede detectarse directamente. Sin embargo, hay observaciones indirectas que los pueden detectar. Este tipo de observaciones ya había sido empleado en estrellas dobles. Una estrella doble o binaria, en realidad, es un par de estrellas lo suficientemente próximas que se atraen gravitatoriamente entre sí, describiendo órbitas keplerianas alrededor de su mutuo centro de masas. En el caso de binarias, muchas pueden verse separadas por métodos astrométricos,

es decir, mediante un telescopio; son conocidas como binarias visuales. Pero si están muy próximas entre sí, con el telescopio se observan como un solo objeto. Sin embargo, están en movimiento alrededor de su centro de masas, por lo que se detecta una variación en la velocidad radial, que se puede medir en su espectro. En el espectro de una estrella aparecen una serie de líneas de emisión o absorción, que corresponden a los distintos elementos químicos (ionizados o no) de que está constituida la estrella. Los elementos químicos emiten estas líneas en determinadas longitudes de onda, por lo que

En 1995, Mayor y Queloz, de la Universidad de Ginebra, anunciaron la primera detección de un exoplaneta alrededor de la estrella 51 Pegasi.

el espectro es, en cierta medida, una huella dactilar de la estrella. Sin embargo, si la estrella está en movimiento, estas líneas características se desplazan periódicamente hacia mayor longitud de onda (lo que quiere decir por el efecto Doppler que la estrella se aleja, corrimiento hacia el rojo) y hacia menor longitud de onda (hacia el azul, la estrella se acerca). Pues bien,



con estas medidas se pueden detectar la mayor parte de los elementos orbitales y el par se denomina estrella espectroscópica.

Otra vía de detección de exoplanetas es mediante la fotometría. Si el planeta pasa por delante de la estrella (visto desde la Tierra), se producirá una disminución de la cantidad de luz que nos llega de la estrella. Esta técnica también ha sido empleada con éxito durante muchos años en el cálculo de órbitas de estrellas dobles, las llamadas eclipsantes. La variación periódica de esta oscilación de luz también permite conocer ciertos elementos orbitales, e incluso el tamaño del planeta con relación a su estrella. Esta técnica es la que está utilizando el satélite COROT de la ESA, cuya misión es detectar exoplanetas de tipo rocoso (es decir, similar en composición a la Tierra) mediante fotometría con un pequeño telescopio de solamente 30 cm de diámetro en órbita terrestre.

En algunos casos, también ha podido conocerse la existencia de un exoplaneta de un modo indirecto, calculando la influencia gravitatoria que tenía que ejercer el planeta para poder explicar las variaciones orbitales que sufre la órbita de una estrella doble.

Puesto que los métodos espectroscópicos son los más empleados en el descubrimiento de exoplanetas, veamos bre-

vemente cómo se pueden obtener los elementos orbitales. Los datos de observación corresponden a curvas (en realidad puntos que se ajustan por una curva) de velocidades radiales del centro de masas, es decir, la proyección de la velocidad a lo largo de la visual observador-objeto. Mediante simples operaciones a partir de las leyes de Kepler, se puede probar que esta velocidad radial satisface la ecuación:

$$VR = K [\cos (\omega + f) + e \cos \omega],$$

siendo el factor K :

$$K = \frac{2\pi}{P} \frac{m}{m+M} \frac{a \sin i}{\sqrt{1+e^2}}$$

donde P es el periodo, M la masa de la estrella, m la masa del planeta, a el semieje mayor, e la excentricidad, i la inclinación, ω el ángulo del periastro y el ángulo f es la anomalía verdadera.

P y K pueden determinarse directamente a partir de la gráfica de observaciones; la excentricidad e , el semieje mayor a y el ángulo del periastro ω también se determinan a partir de los datos de observación (tras un proceso no tan directo). La masa M de la estrella puede estimarse por su tipo espectral y, por último, se puede calcular el producto ($m \sin i$), sin que pueda determinarse el valor de la masa del planeta, a no ser que se disponga de observaciones adicionales, como por ejemplo, astrométricas.

Mediante la tercera ley de Kepler, puede verse que la constante observada K es directamente proporcional al producto $m \sin i$, e inversamente

proporcional a la raíz cuadrada de M a, por lo que K es mayor (y por lo tanto más fácil de observar) si la masa m del planeta es elevada y el semieje mayor a es pequeño. Esta es la razón por la que la mayor parte de los exoplanetas detectados tienen una masa muy grande y se encuentran muy próximos a la estrella. Para la mayor parte de los planetas descubiertos, $K > 30$ m/s. Para un planeta con idénticas características que nuestra Tierra (masa y semieje mayor), $K = 10$ cm/s, límite que se encuentra muy por debajo de lo que pueden captar los mejores espectrógrafos y dentro de orden de las variaciones de velocidad radial por turbulencias de la estrella.

Como acabamos de ver, no es casual que la mayor parte de planetas descubiertos sean de gran masa y muy próximos a su estrella, justo al revés de lo que ocurre en nuestro sistema solar, lo que a su vez ha supuesto una revisión de las teorías de formación de sistemas plane-

tarios puesto que, cuando solamente se conocía el sistema solar, la teoría tenía que explicar solamente éste pero, al descubrirse sistemas muy distintos del nuestro, ha habido que explicar la causa de estos sistemas tan diferentes.

En principio, las teorías de formación planetaria dicen que los planetas se forman por acreción de polvo y gas en un disco alrededor de la estrella. Este hecho viene confirmado por observaciones de estrellas jóvenes con discos de polvo y gas, y que se sospecha que poseen grandes planetas. Cuando se forma un planeta, va recogiendo la materia de un anillo circular, abriendo claros en el disco. Se creía hasta 1990 que, cuando el planeta adquiría el tamaño de Júpiter, ese claro ya está vacío y por lo tanto el planeta no crece más. Sin embargo, simulaciones modernas muestran que el planeta va acumulando más materia que le llega a través de una especie de puentes que proceden de la parte externa del anillo y que conectan el planeta con el disco. Esta estruc-

tura viene explicada por la teoría del problema de 3 cuerpos, uno de los temas más estudiados en Mecánica Celeste desde Euler hasta la actualidad; la transferencia de masa tiene lugar, precisamente, por los puntos de Euler de dicho problema. Si la masa del planeta alcanza 80 veces la de Júpiter, se produce la fusión del Hidrógeno, dando lugar a una estrella marrón. Una vez formado el planeta, éste sigue con el disco, pudiendo dar lugar a estructuras de anillos, tal como sucede con los planetas de mayor tamaño de nuestro sistema solar.

Con el descubrimiento de los exoplanetas, se ha abierto un nuevo campo en la Astronomía.

La dinámica anterior puede explicarse modelizando el movimiento de una partícula que inicialmente se encontrase en un movimiento circular próximo al planeta. Esta partícula choca con el resto de partículas transferidas del disco, originando una transferencia de energía que recibe el planeta y que origina que empujen al planeta hacia el interior. Si bien este efecto es muy pequeño debido a la poca masa de la partícula, resulta que son muy numerosas, por lo que en conjunto tienen el efecto de que acercan el planeta hacia la estrella. El estudio cuidadoso de las ecuaciones diferenciales que rigen este movimiento lleva a la conclusión de que la órbita disminuye de tamaño y aumenta la excentricidad. Al desaparecer estas partículas también lo hace su efecto, de modo que sus órbitas se estabilizan.

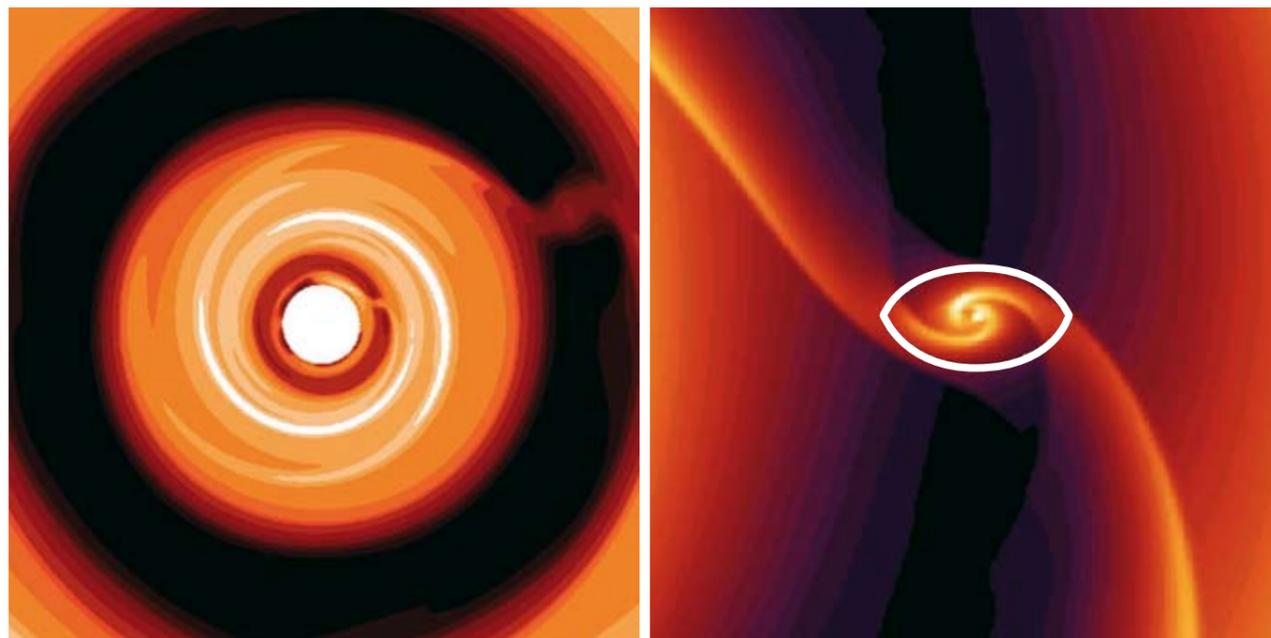
Otra de las características, que presentan muchos de los sistemas extra solares descubiertos, es que poseen varios planetas con conmensurabilidades entre sus periodos. Este fenómeno no sucede entre los planetas del sistema solar, pero sí que es frecuente entre los satélites de los planetas. Las teorías desarrolladas para explicar estas conmensurabilidades o resonancias en los satélites, por ejemplo entre los satélites galileanos de Júpiter, se están empleando para explicar las resonancias entre exoplanetas pero, dado que las masas y periodos son tan distintos a los de los exoplanetas, se ha abierto una línea de investigación en la dinámica orbital para entender este fenómeno y de qué modo la presencia de resonancias va a afectar al movimiento secular de los planetas, es decir, a su movimiento en periodos muy amplios de tiempo.

En resumen, con el descubrimiento de los exoplanetas, se ha abierto un nuevo campo en la Astronomía, tanto desde el punto de vista observacional, donde se emplean técnicas ya utilizadas en estrellas dobles, complementadas con otras nuevas técnicas, incluyendo satélites artificiales, como desde el teórico, explicando el por qué los sistemas descubiertos son tan diferentes de nuestro sistema solar. Además, surgen otras cuestiones en las que se está avanzando, como es el identificar qué exoplanetas pueden ser habitables, o por lo menos pueden albergar vida.

Como vemos, la Astronomía, una ciencia observacional, sigue viva ofreciendo nuevos retos intelectuales al ser humano.

Antonio Elipe

Dpto. de Matemática Aplicada
Director del Centro Universitario de la Defensa
Universidad de Zaragoza



Simulación de la generación de planetas a partir de la nube de polvo que envuelve a una estrella. La acreción de polvo hace que se forme un vacío una vez formado el planeta (izda). Sin embargo, también puede seguir recibiendo masa de la parte externa del disco de polvo mediante mecanismos más complejos.



Figura 1 (a)

EL UNIVERSO DESDE JAVALAMBRE

1.- UNA BREVE INTRODUCCIÓN

La elaboración de concepciones y teorías cosmológicas no es privativo de nuestra época. Todas las civilizaciones han pretendido comprender la estructura subyacente del Universo, lo que le da coherencia y lo hace inteligible y comprensible. Lo que es nuevo en nuestra época es la capacidad para sondear astros cada vez más lejanos, para estudiar su distribución y sus propiedades y para ahondar en el contenido último y la estructura del Universo.

La Cosmología que hoy conocemos empieza a construirse a principios del siglo XX sobre dos grandes pilares, uno teórico y otro observacional. Siendo la gravedad la única fuerza que puede actuar a cualquier distancia y con independencia del estado en que se encuentren la materia o la energía, la Cosmología, como estudio del Universo a grandes escalas, se constituye en el reino de la gravedad. De modo que cuando Einstein formula una nueva teoría gravitatoria, la Relatividad General, se abre un nuevo mundo para el estudio del Universo. Su planteamiento radicalmente global permite superar los problemas encontrados por la teoría de Newton, de carácter local, de modo que la tentación cosmológica de la teoría es inmediata. Apenas formulada, el mismo Einstein elaborará el primer modelo cosmológico. Sin embargo, en este modelo Einstein no hará uso de una de las características centrales de su teoría, el carácter dinámico del espacio-tiempo que, muy poco después, se va a convertir en elemento clave de la nueva Cosmología, esencial para interpretar los datos que las incipientes observaciones van presentando.

POR MARIANO MOLES

El otro pilar es el descubrimiento de las galaxias como sistemas externos e independientes de nuestra Vía Láctea, similares a ella y situadas a distancias extraordinarias (Figura 1). Este descubrimiento, culminado por Hubble hacia 1924, supone un descomunal cambio de escala que da su verdadera dimensión a esa nueva Cosmología. Son las galaxias, y no las estrellas como hasta entonces se admitía, los ladrillos del Universo, los elementos que lo componen y estructuran. Pero hay más.

Desde finales del siglo XIX se había comenzado a obtener espectros de las galaxias más próximas. En la gran mayoría de los casos se apreciaba que las líneas espectrales bien identificadas, correspondientes a elementos químicos comunes, se presentaban a longitudes de onda superiores a las que se miden en el laboratorio. En la misma segunda década del siglo XX en que se descubrió la existencia de las galaxias, Hubble encontró que el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales emitidas por una galaxia y la distancia a la que ésta se encuentra están relacionadas, de modo que midiendo

“**Cuando Einstein formula una nueva teoría gravitatoria, la Relatividad General, se abre un nuevo mundo para el estudio del Universo.**”

el primero se puede determinar la segunda. La ley de Hubble, como se le conoce actualmente, es un hecho observacional incontestable, que se ratifica cada vez que se observan galaxias con un telescopio (Figura 2). La importancia de tal ley es central para cualquier cosmología pues permite situar a las galaxias en el espacio tridimensional.

La convergencia de teoría y observaciones fue muy rápida. Pocos años después del modelo de Einstein se estableció el primer modelo cosmológico dinámico, en el que el espacio-tiempo ya no es siempre el mismo. La propuesta es relativamente simple y ahí radica su fuerza. Propone que el espacio-tiempo cambia sólo con el tiempo, manteniéndose constante en cada sección espacial. Eso permite inmediatamente asociar un instante a cada una de esas secciones espaciales y definir por tanto un tiempo cósmico. También dar un paso más hacia la caracterización dinámica del Universo. En efecto, dado que la información se propaga a velocidad finita, ordenar las galaxias por sus distancias (determinadas a partir de la medida del desplazamiento de las líneas espectrales y aplicando la ley de Hubble) equivale a ordenarlas en una escala temporal. Si, además, existen argumentos para pensar que las galaxias se han formado en épocas similares, lo anterior significa que es posible situar a las propias galaxias en secuencias evolutivas.

Por lo demás, el modelo es también simple desde el punto de vista matemático. Está descrito por una sola variable, que depende sólo del tiempo, que es el llamado parámetro de escala (α , en términos menos rigurosos, el tamaño del Universo), que determina en cada momento todas las propiedades geométricas. Esta formulación, propuesta por primera vez por el meteorólogo ruso Friedman, no fue aceptada de inmediato e incluso el propio Einstein la desdeñó. Pero tenía una virtud esencial que le hizo imponerse a las críticas: su capacidad para aportar una explicación directa a la ley de Hubble. La deduc-

Figura 1. El mundo de las galaxias.

- a) Galaxia irregular, satélite de M81, catalogada como M82. Presenta una morfología poco estructurada, con intensa formación estelar, manifestada por la emisión de hidrógeno ionizado codificada en rojo (fuente: <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2006-14-a-print.jpg>).
- b) Galaxia de tipo elíptico, catalogada como NGC1132. La distribución de luz es suave, sin estructuras ni irregularidades, a partir de la concentración central (fuente: <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2008-07-a-full.jpg>).
- c) Galaxia de tipo espiral, catalogada como M81. Se aprecia la presencia de un bulbo central y la estructura más extensa de disco con brazos espirales (fuente: <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2007-19-a-hires.jpg>).

Figura 2. Ilustración de la ley de Hubble que relaciona el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de las galaxias con su distancia, para Supernovas de tipo Ia (fuente: R. P. Kirshner, PNAS, 1, 8-13).

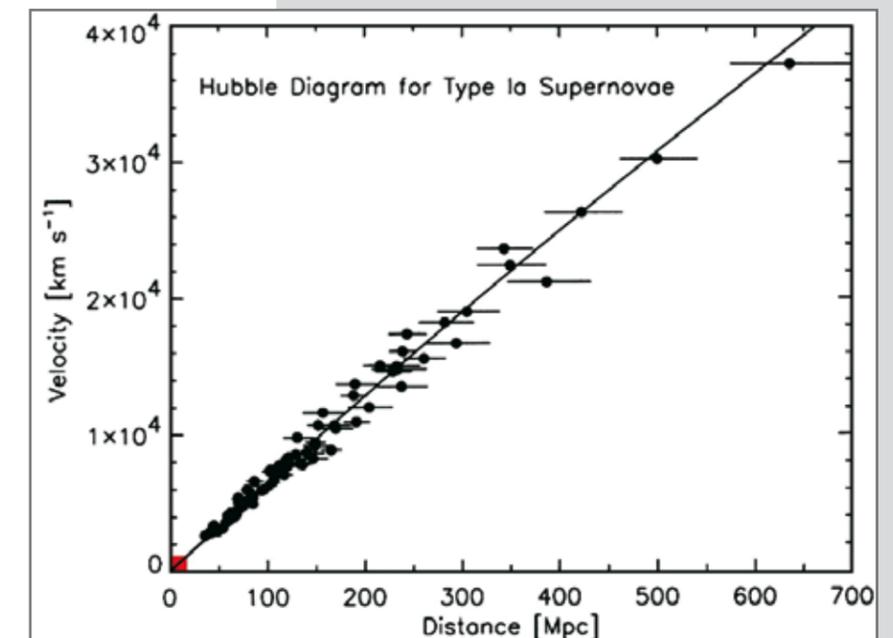
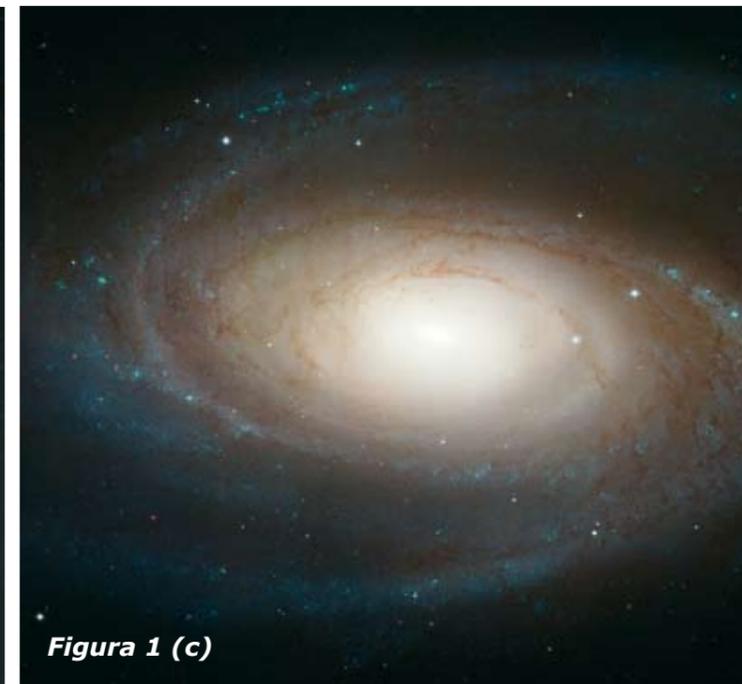
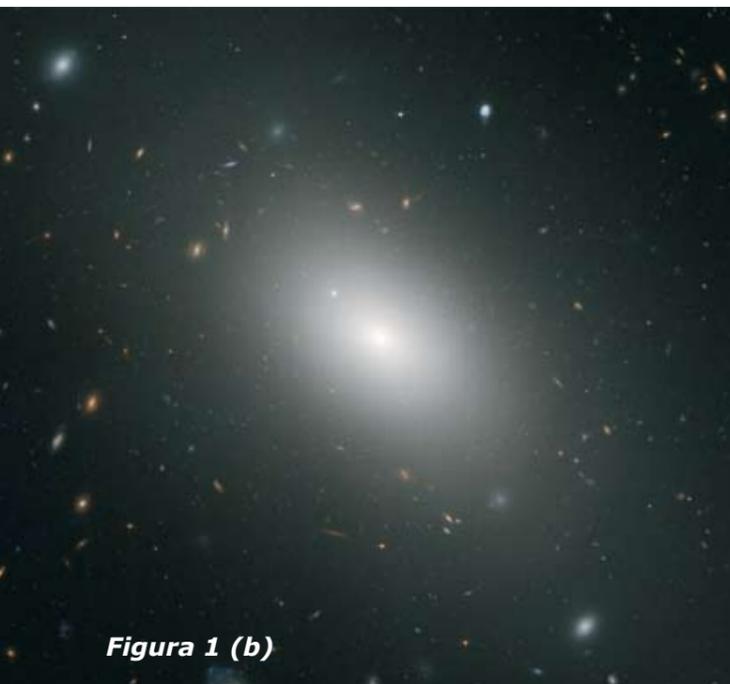
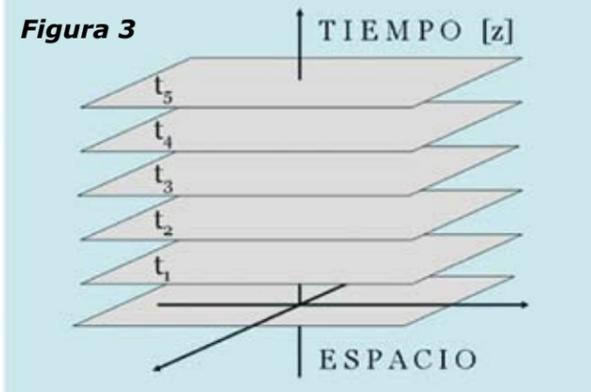


Figura 1 (b)

Figura 1 (c)

Figura 2



ción es inmediata: al igual que el parámetro de escala, la métrica cambia con el tiempo. Y con la métrica las distancias. De modo que la distancia entre dos crestas de un tren de ondas también cambia con el tiempo. Si ese cambio es un aumento, la longitud de onda de ese tren de ondas también aumenta con el tiempo, produciéndose un desplazamiento hacia el rojo, que es lo que

se observa. Y puesto que la distancia cambia también de manera análoga, con el tiempo, ambos cambios deben estar relacionados entre sí. Es la ley de Hubble.

La condición que imponen las observaciones es que se trata de un desplazamiento hacia el rojo, no hacia el azul. Esto se traduce porque el parámetro de escala es una función creciente del tiempo, de modo que el Universo que resulta es cada vez más grande o, en otros términos, representa un Universo en Expansión. Este es el hecho básico, la piedra angular sobre la que se asienta nuestra Cosmología. Como ya dijimos, el modelo conlleva la existencia de un tiempo cósmico, es decir, el mismo para todos los puntos de una sección espacial dada. La ordenación de las secciones espaciales como momentos del tiempo cósmico lleva inmediatamente a la noción de evolución del Universo (Figura 3). Es decir, no sólo evolucionan localmente todos los

Figura 4 (a)

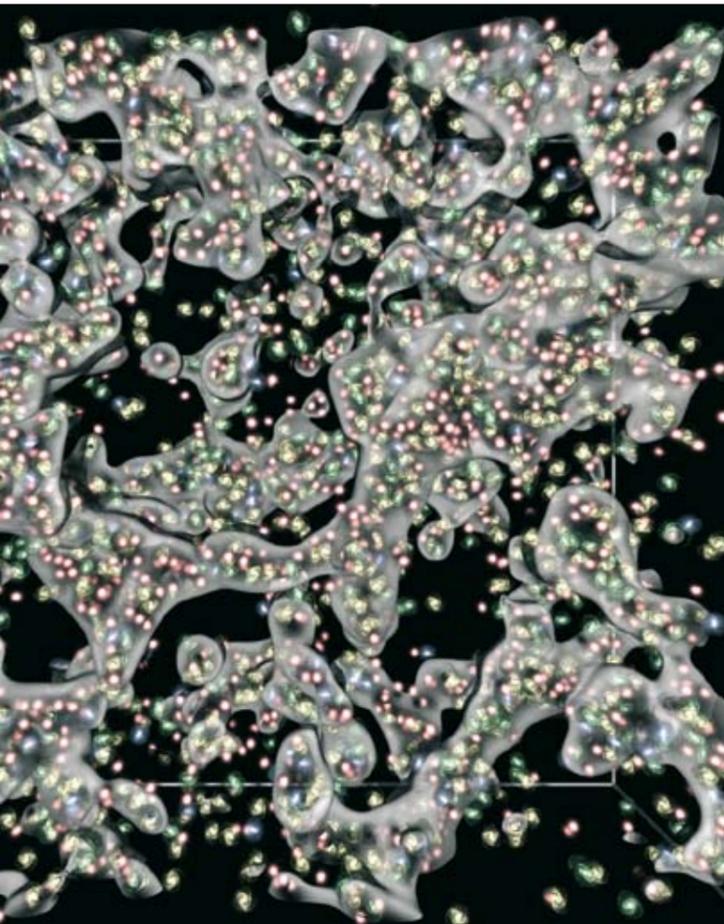
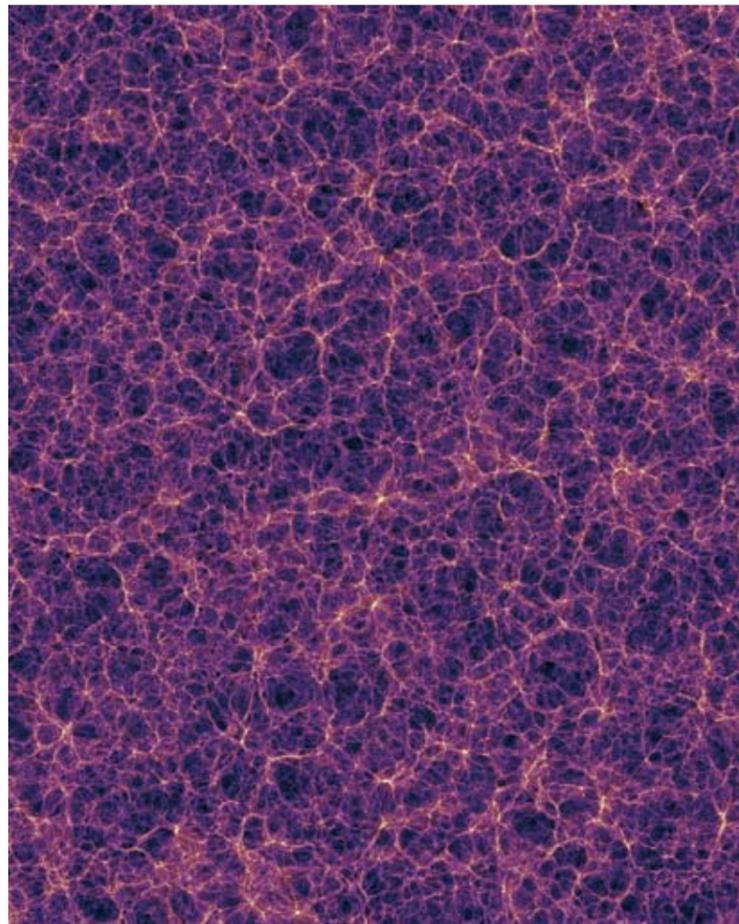


Figura 4 (b)



cuerpos y estructuras que contiene, sino él mismo, su métrica y, en consecuencia, sus propiedades globales.

Siguiendo ya dentro de este modelo, se deduce que en el pasado el Universo era más pequeño, más denso, más caliente y estaba menos estructurado. Incluso, en algún momento de ese pasado, las condiciones fueron tales que la materia y la radiación estaban en equilibrio, formando un todo homogéneo sin estructuras, con tan sólo pequeñas fluctuaciones locales en sus propiedades. De ese pasado denso y caliente nos queda como principal reliquia la radiación de fondo, descubierta en la década de los 60 del siglo XX y cuyas propiedades han podido medirse con extraordinaria precisión. Nos quedan también, de épocas aún más remotas, los elementos químicos más ligeros después del hidrógeno, el helio en particular, que fueron sintetizados cuando el Universo tenía la densidad y temperatura adecuadas para que se produjese la fusión termonuclear del hidrógeno. Y nos quedan, como huellas del pasado cuántico del Universo, todavía más remoto en el tiempo, las galaxias y estructuras que se generaron a partir de las pequeñas fluctuaciones en ese contenido, por los demás indiscriminado y sin estructurar, del Universo en aquella época (ver conCIENCIAS, nº 2, *Los Fósiles del Universo*). Es la gravedad, actuando sobre ellas, la que ha hecho su trabajo de estructuración, como nos muestran las simulaciones (Figura 4).

En este esquema, enriquecido por múltiples datos de observación y elaboraciones teóricas, la expansión del Universo se va frenando por la acción gravitatoria, que se opone a esa expansión. De modo que la expectativa inmediata es que el ritmo de expansión fuese mayor en el pasado ya que se va decelerando con el tiempo. Tan evidente parecía esta conclusión que, cuando se desarrolló la formulación del modelo en base a los llamados parámetros cosmológicos, el que describe el cambio de ritmo de la expansión se denominó parámetro de deceleración. Hasta que los datos, una

Figura 3. Ilustración de la noción de tiempo cósmico que resulta de la estructura espacio-temporal del modelo de Friedman. Las secciones espaciales pueden ordenarse según el valor del parámetro temporal, que juega por lo tanto el papel de un tiempo común.

Figura 4. La distribución de materia en el Universo.

(a) La distribución de galaxias según los datos del *2dF Galaxy Survey*, que contiene más de 100.000 galaxias (fuente: <http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>).

(b) Resultado de las simulaciones (*Millennium Simulation*) de la estructura a gran escala del Universo (fuente: http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/seqB_063.jpg).

“ Son las galaxias, y no las estrellas, los ladrillos del Universo, los elementos que lo componen y estructuran. ”

vez más, han obligado a reconsiderar nuestra visión del Universo, obligando a ese parámetro a cambiar de signo.

2.- ESTRUCTURA Y CONTENIDO DEL UNIVERSO. LOS DATOS Y SU ENCAJE

A lo largo de los años, desde su primera formulación, los datos relevantes para la Cosmología se han ido acumulando, cada vez más precisos y numerosos. Y con ellos han venido las constataciones y las sorpresas. Hasta el punto que, a día de hoy, la conclusión (siempre provisional en ciencia) sería que el Universo está, contrariamente a lo esperado, en expansión acelerada. El agente causante de esa aceleración, conocido como Energía Oscura, supondría el 73% del contenido del Universo. Del 27% restante, tan

sólo el 4% correspondería a materia bariónica, mientras que el otro 23% del Universo sería la Materia Oscura, cuya naturaleza se desconoce.

El valor básico de los modelos es el de ofrecer un marco interpretativo para los datos que se van obteniendo. Dentro del modelo cosmológico estándar, hijo de la Relatividad General, la existencia de materia y energía oscuras no es una hipótesis sino que se desprende de las observaciones. Se trata de constituyentes del Universo cuyos efectos gravitatorios se detectan, aunque no conozcamos aún su naturaleza. Puede ocurrir que, en algún momento, se cambie de paradigma y de marco interpretativo, como otras veces en la historia. Pero serán los datos de las observaciones los que impulsen esos cambios y los que, al final, validen las opciones teóricas adecuadas.

2.1 La Materia Oscura.

La primera sorpresa, que produjeron las observaciones a escalas suficientemente grandes, fue el constatar que la mayor parte de la materia que contiene el Universo no está encerrada en estrellas ni emite luz. Resaltemos, en este punto, que para llegar a esta conclusión no es necesario invocar la Cosmología y los modelos cosmológicos, sino que resulta de consideraciones básicas sobre el equilibrio dinámico de sistemas.

Históricamente fue el astrónomo suizo-americano F. Zwicky quien constató esta cuestión por primera vez. Al estudiar el Cúmulo de Galaxias en Coma Berenices (Figura 5) consideró que podría tratarse de un sistema en equilibrio y, por lo tanto, podría aplicársele el teorema del virial: la suma de la energía cinética y potencial debe ser nula. La idea es que las galaxias se

Figura 5. Cúmulo de Galaxias en Coma Berenices, situado a una distancia de unos 332 millones de años-luz. Fue el primer cúmulo del que se estudió la dinámica interna que puso de manifiesto la existencia de materia no-luminosa. El sistema está dominado por las dos galaxias centrales, NGC4874 y NGC4889 (fuente: NASA/JPL-Caltech/GSFC/SDSS).

Figura 5



“ La ley de Hubble es un hecho observacional incontestable que se ratifica cada vez que se observan galaxias con un telescopio. ”



Figura 6

mueven como partículas de prueba en el potencial general del Cúmulo, de modo que la dispersión de velocidades del sistema, medida a partir de las diferencias de velocidad entre las galaxias del mismo, junto con la medida de un tamaño característico, debería darnos la Masa dinámica (total) del mismo. Al calcularla Zwicky constató que el valor resultante excedía en un factor muy importante, más allá de cualquier error de medida, el de la suma de las masas de las galaxias deducida de sus luminosidades. La diferencia fue bautizada por Zwicky como masa oculta. Este resultado se ha reforzado, sin excepción, con los datos que se han ido acumulando desde entonces.

Hoy sabemos que las galaxias contienen materia oscura, según se deduce de su propia diná-

mica interna. Y sabemos también que hay una componente de materia bariónica en el espacio intergaláctico dentro de cada cúmulo, en forma de gas caliente en equilibrio en el potencial del Cúmulo, que emite en rayos X (Figura 6). Esta componente supera ampliamente a la estelar y es el mayor contribuyente al 4% de materia bariónica, pero no resuelve la cuestión de la materia oscura, que sigue siendo dominante en el balance dinámico global de los Cúmulos de Galaxias.

La Relatividad General prevé otro efecto básico que permite estimar la masa de un sistema, el efecto de lente gravitatoria. La teoría establece que toda forma de materia o de energía produce y experimenta efectos gravitatorios, incluida

la luz. Como consecuencia, cuando los fotones pasan a cierta distancia de un cuerpo, su trayectoria se curva. La desviación depende de la masa de ese cuerpo y, por lo tanto, midiendo esas desviaciones se puede determinar la masa que las produce. Este efecto es puramente relativista pues en la teoría de Newton la energía no gravita. Y por eso constituye un test de la teoría de Einstein, prueba que superó en 1919 cuando se pudo medir por primera vez la desviación de la luz que viene de estrellas situadas a pequeña distancia angular del Sol. Los Cúmulos de galaxias, grandes concentraciones que pueden alcanzar hasta 10^{15} masas solares, producen el mismo tipo de efecto sobre la luz emitida por galaxias lejanas situadas a pequeñas distancias angulares del centro de cada cúmulo (Figura 6). De esa forma se puede ponderar las masas totales de esos cúmulos. Los resultados son totalmente consistentes con los que se obtienen por medios dinámicos.

La materia oscura apenas interacciona con la materia salvo gravitatoriamente. Esto, que supone un gran problema para el estudio de su naturaleza, permite visualizarla en algunas situaciones. Recientemente se han descubierto algunos casos en los que 2 cúmulos de galaxias colisionan. Cuando esto ocurre, la materia bariónica intergaláctica disipa parte de la energía en la interacción puesto que es sensible a otras fuerzas además de las gravitatorias. Por su parte, la materia oscura de un cúmulo pasa a través de la del otro sin prácticamente sentir ninguna otra fuerza más que la gravedad. Como resultado, se observa la materia oscura (detectada por sus efectos de lente gravitatoria) en ambos lados de la zona central de la colisión, mientras que la bariónica difusa (detectada por su emisión en rayos X) se apela en esa zona central (Figura 7). La prueba de su existencia y de su comportamiento, apenas sensible a fuerzas que no sean las gravitatorias (de ahí el nombre de partículas débilmente interactuantes, WIMP, que se da a las partículas que la componen) es contundente.

2.2 La Energía Oscura.

Utilizando los parámetros cosmológicos, la consistencia del modelo estándar se puede expresar mediante la ecuación:

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda - \Omega_k = 1$$

Figura 6. Cúmulo Abell 1689, situado a unos 2420 millones de años-luz. Sobre la imagen óptica de las galaxias del cúmulo se ha superpuesto la emisión en rayos-X del gas caliente intra-cúmulo, codificado con colores azules-violetáceos. Se aprecia la presencia de numerosas imágenes deformadas de galaxias lejanas, debido al efecto lente gravitatoria de la masa del cúmulo sobre la luz que proviene de esas galaxias lejanas (fuente: <http://chandra.harvard.edu/photo/2008/a1689/a1689.jpg>).

“ En el pasado, el Universo era más pequeño, más denso, más caliente y estaba menos estructurado. ”

en donde Ω_m representa la contribución de la materia (incluida la oscura) y la energía asociada a los campos conocidos; Ω_Λ representa la contribución de la constante cosmológica, Λ , una constante de integración que aparece en las ecuaciones de Einstein, y Ω_k representa la contribución de la curvatura de las secciones espaciales del espacio-tiempo. Por razones de simplicidad teórica, y para evitar ciertas paradojas con el modelo aceptado, se proponía hasta hace algo más de 10 años que tan sólo la densidad de materia-energía del Universo era relevante, por lo que debería valer 1, el valor crítico que separa los modelos cerrados de los abiertos. Sin embargo, los datos (en particular, los de cúmulos de galaxias) se resistían a entrar en este esquema puesto que proporcionan valores de Ω_m claramente inferiores a 1, abogando así por un Universo abierto, en el que la atracción gravitatoria, aún siendo capaz de decelerar la expansión, es incapaz de detenerla.

Hay que seguir explorando. Las ecuaciones de Einstein ponen en relación la geometría del espacio-tiempo con el contenido energético-material. De modo que midiendo ese contenido puede deducirse y determinarse la geometría del Universo. Y, en el otro sentido, también puede decirse que la geometría del espacio-tiempo fija el contenido material-energético del Universo (y su comportamiento dinámico). De tal forma que midiendo aspectos geométricos del Universo, tales como distancias, ángulos, áreas o volúmenes, se podrá extraer conclusiones sobre su contenido.

Los astros que nos permiten medir las distancias más lejanas son las Supernovas. Estas explosiones estelares son extremadamente brillantes, por lo que pueden ser detectadas a enormes distancias. Además, si se seleccionan aquéllas que pertenecen a una familia bien definida porque manifiestan siempre el mismo fenómeno físico, todas tendrán (aproximadamente) la misma luminosidad intrínseca, por lo que podrán ser utilizadas para medir distancias a partir de

las luminosidades observadas. Precisamente, la comparación de ambas luminosidades permite deducir las distancias y, en consecuencia, la geometría subyacente. Este programa de medida de distancias, llevado a cabo por dos equipos independientes, arrojó una enorme sorpresa: la expansión del Universo, en lugar de frenarse con el tiempo, se va acelerando. Los resultados no pueden ser explicados salvo si se añade un término como Ω_Λ .

Por otro lado, cuando se tienen en cuenta los resultados del análisis de las fluctuaciones de la radiación de fondo, se concluye que el efecto de la curvatura espacial es nulo, de modo que la ecuación maestra se reduce a la suma de dos términos, el de materia-energía y el de la constante cosmológica. Para la época actual, el primero representa el 27% mientras que el segundo representa el 73%.

Este resultado ha conmocionado la Cosmología. Las observaciones que se están planificando tendrán que corroborarlo y, en su caso, avanzar en su análisis. El término responsable de esa aceleración que podría ser, en principio, la constante cosmológica, se analiza en una perspectiva más amplia. En efecto, desde Saharov Λ se relaciona con la energía del vacío pues se puede interpretar como el tensor impulsión-energía para el caso vacío. De modo que, según este punto de vista, la constante cosmológica jugaría, desde el punto de vista cuántico, el papel de densidad de energía del vacío. Esta aproximación a la constante cosmológica plantea serias dificultades puesto que, desde el lado de la teoría de campos, se predice para Λ un valor que es decenas de órdenes de magnitud superior al límite impuesto por las observaciones.

Sea como sea, los datos indican que la expansión se acelera y por tanto debe existir un componente responsable. Es lo que se denomina como Energía Oscura, concepto que de algún modo viene a generalizar la constante cosmológica considerándola como un campo físico, que

evoluciona muy lentamente con el tiempo. La llamada ecuación de estado del Universo es simplemente la que corresponde a ese campo (con $c=1$):

$$p = -w\rho$$

en donde p y ρ son la presión y la densidad del campo en cuestión. El caso $w = 1$ corresponde a la constante cosmológica. Admitida su existencia, el problema es el de hallar cuanto vale w . Y ésta es una cuestión que se puede abordar desde el punto de vista observacional.

Como ya dijimos, la principal característica del Universo, según el modelo estándar, es que evoluciona. Su métrica cambia con el tiempo y con ella la importancia relativa de cada uno de sus constituyentes. En efecto, durante las primeras fases evolutivas la materia-energía domina totalmente, mientras que el efecto de la constante cosmológica (o de la energía oscura) es totalmente despreciable. A medida que la expansión progresa, el efecto de la materia-energía en el balance global va disminuyendo mientras que el de la energía oscura va aumentando (Figura 8). Hasta que llega un momento en esa evolución en que este segundo término llega a dominar, y se produce la aceleración de la expansión. A partir de ahí la situación ya no es reversible y esa aceleración continuará para siempre. Se trata pues de determinar el momento de cambio de régimen y de capturar en los datos esa evolución de la métrica.

Figura 7. Sistema catalogado como MACS J0025.4 – 1222, situado a unos 5700 millones de años-luz. Se trata de 2 cúmulos de galaxias en colisión. En azul está codificada la distribución de materia oscura, medida a partir del efecto lente gravitatoria. En rojo se ha codificado la emisión en rayos-X de la materia bariónica difusa. La imagen pone en evidencia el diferente comportamiento de ambas componentes y, por consiguiente, su distinta naturaleza (fuente: http://chandra.harvard.edu/graphics/resources/desktops/2008/macs_1920.jpg).



Para ello se han propuesto hasta 4 métodos diferentes. Cada uno de ellos tiene sus inconvenientes y sus ventajas, de modo que lo que se recomienda es utilizar los 4 métodos y combinar la potencia de cada uno de ellos para obtener resultados más precisos. El primero es de las Supernovas como indicadores de distancia. Los otros tres tienen que ver con la influencia que la presencia de la energía oscura puede tener sobre la distribución de materia en el Universo y sus cambios con el tiempo: densidad de cúmulos en función de la distancia (es decir, del tiempo), deformaciones de las galaxias lejanas producidas por la presencia de materia oscura (efecto lente gravitatoria débil) y peculiaridades en la distribución de galaxias en función de la escala de agrupamiento. Este último método pretende medir las Oscilaciones Acústicas de Bariones (BAO de sus siglas en inglés).

En sus etapas tempranas, el Universo es un plasma en equilibrio que contiene radiación, materia bariónica, diferentes campos cuánticos y materia oscura. Una fluctuación en la distribución de materia oscura produce el mismo tipo de fluctuación en la materia bariónica que, a medida que el Universo se expande, se va desplazando como una onda esférica alrededor del punto en el que se originó. Pero, a medida que el Universo se expande también se va enfriando, hasta que el equilibrio entre sus constituyentes ya no puede mantenerse. En ese momento, la materia bariónica acumulada en esa fluctuación queda congelada, produciendo una cierta sobredensidad a una distancia característica del centro en el que empezó. Esa distancia es obviamente la que pudo recorrer desde que empezó hasta que quedó congelada, propagándose a la velocidad del sonido en el plasma, distancia que corresponde al horizonte sónico. Esto es lo que se ha observado a distancias relativamente pequeñas (**Figura 9**). Este cuadro simplificado permite ilustrar la predicción de que la distribución de galaxias presenta una anomalía, una sobreconcentración a la escala correspondiente a aquel

horizonte sónico. Esta escala, siempre la misma físicamente, cambia a medida que cambia la métrica de modo que, si la medimos a diferentes distancias, se podrá determinar el ritmo de expansión en diferentes épocas y de ahí determinar la energía oscura en cada una de ellas y, por tanto, si es constante o varía con el tiempo. Así de fácil, al menos en apariencia.

3.- NUEVOS PROBLEMAS, NUEVAS ESTRATEGIAS. EL OBSERVATORIO DE JAVALAMBRE, UNA NUEVA VENTANA AL UNIVERSO

El modelo cosmológico, a la vista de los resultados observacionales, se encuentra en una situación de crisis que hay que resolver con datos nuevos, que permitan poner de manifiesto fenómenos muy sutiles que sólo son perceptibles a gran escala. El desafío no es pequeño. Y lo que está en juego, tampoco. Al decir de los expertos que escribieron el *Dark Energy Task Force Report* (Albrecht et al., *astro-ph/0609501*, 2006):

La aceleración del Universo es, junto con la materia oscura, el fenómeno observado que de forma más directa demuestra que nuestras teorías de partículas elementales y gravedad son incorrectas o incompletas. La mayoría de los expertos creen que se necesita nada menos que una revolución en la manera en que comprendemos la física fundamental para entender plenamente la aceleración cósmica.

Estamos, pues, ante problemas centrales para la Ciencia y para la Física, que se han planteado en el terreno de la Astrofísica y de la Cosmología, y en él hay que resolverlos. Nuevos problemas que demandan nuevas estrategias: será necesario establecer colaboraciones entre especialistas de diferentes ramas de la Física y, además, habrá que desarrollar nuevos instrumentos que permitan llevar a cabo las medidas relevantes en escalas de tiempo razonables.

Sobre estas bases, y para contribuir al estudio de problemas como los citados, se estableció en 2007 el proyecto Javalambre. La propuesta inicial consiste en la realización de un gran cartografiado que permita estudiar, como objetivo central, las BAO a diferentes distancias (proyecto *Physics of the Accelerating Universe*, PAU, Consolider Ingenio 2007, ver Benítez et al., *ApJ*, 691, 241, 2009). Los datos del cartografiado permitirán, también, abordar el problema con dos métodos más de los mencionados antes, el del efecto débil de lente gravitatoria y el de la formación y crecimiento de estructuras y de recuento de cúmulos. Por otro lado, los datos serán del máximo interés, también, para el estudio de la formación y evolución de galaxias, para la Física estelar o para el descubrimiento y análisis de objetos del

“ La expansión del Universo, en lugar de frenarse con el tiempo, se va acelerando. Este resultado ha conmocionado la Cosmología. ”

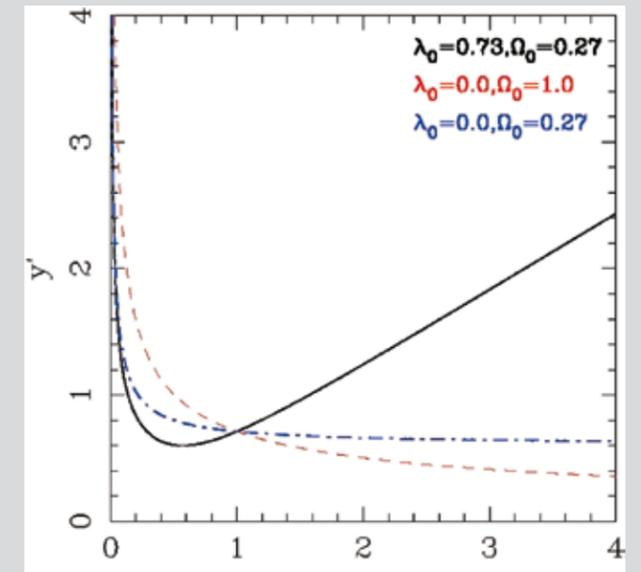


Figura 8. En este diagrama se muestra el comportamiento del ritmo de expansión (derivada con respecto al tiempo del parámetro de escala) con dicho parámetro (directamente relacionado con el desplazamiento hacia el rojo, es decir, con el tiempo). Se aprecia que, en el caso de constante cosmológica no nula, se produce un cambio en ese ritmo que empieza decelerándose para luego acelerarse (fuente: M. Moles, 1991, *ApJ*, 382, 369-376).

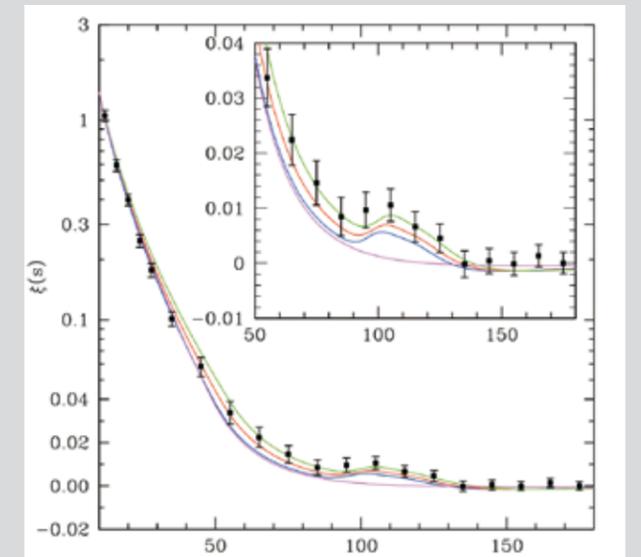


Figura 9. Detección de la señal producida por las oscilaciones acústicas de bariones (BAO) en la distribución de galaxias. Se representa la amplitud de la función de correlación de dos puntos en función de la escala (comóvil), en unidades de $h=100/H$, siendo H la constante de Hubble (fuente: http://cmb.as.arizona.edu/~eisenste/acousticpeak/paperfigs/xi_jack.eps).

Sistema Solar. En suma, gracias a la técnica observacional utilizada y, como consecuencia de ello, a la ausencia de sesgos de selección, el cartografiado se constituirá en un Proyecto-Legado de máxima utilidad para todas las ramas de la Astrofísica.

La naturaleza del proyecto y de los problemas que aborda imponen sus exigencias sobre los instrumentos necesarios para llevarlo a cabo. El Universo, se admite, es homogéneo (e isótropo) a escalas suficientemente grandes. Por debajo de esa escala, que todavía no está bien determinada, cualquier característica que se considere presenta fluctuaciones que suponen una especie de ruido sobre esa homogeneidad básica y que se conoce como varianza cósmica. A lo que hay que añadir el ruido inherente a las propias medidas y a la determinación de aspectos básicos como el desplazamiento hacia el rojo, es decir, la distancia. Para que el muestreo de las escalas sea suficiente y el fenómeno que se busca detectar pueda aflorar por encima de esa varianza combinada con los errores de medida, hay que muestrear grandes volúmenes cósmicos, del orden de varios Gp^3 ($1Gpc = 3,24 \times 10^{27}$ cm). En efecto, el análisis de errores nos indica que, para que se puedan poner condiciones estrictas sobre la ecuación de estado, el error con que hay que determinar la escala de los BAO no debe superar el 0.5%. La conclusión de ese análisis, habida cuenta de los errores esperados en los datos, es que es necesario muestrear un volumen $V > 10 Gp^3$. Dado que la técnica utilizada permite muestrear de manera sistemática hasta distancias correspondientes a un desplazamiento hacia el rojo, $z \sim 1$ (que corresponde a una distancia radial comóvil de 10.800 millones de años luz) es necesario cubrir una superficie de unos 8.000 grados cuadrados. O, lo que es lo mismo, si descontamos la superficie ocupada por el plano galáctico y las zonas relativamente próximas al horizonte, para las que las condiciones de observación no son adecuadas (menos de 40° de elevación), se necesita cubrir prácticamente todo el cielo accesible desde una localización.

¿Cómo se traduce todo eso a la hora de escoger o diseñar los instrumentos necesarios? Se conoce como *Etendue* el producto del área colectora de un telescopio (en m^2) por el campo de visión (en grados cuadrados). La *Etendue* es el parámetro que traduce la eficiencia de un telescopio para observar una cierta superficie sobre la esfera celeste hasta una cierta profundidad. En general la *Etendue* disminuye con el tamaño del telescopio, lo que indica que es un auténtico desafío técnico hacer un telescopio, con una escala apropiada de imagen, en que ese factor sea suficientemente grande (Figura 10). En nuestro proyecto para el Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ) proponemos la construcción de un telescopio de 2.5 m de apertura, con escala de $0.34''/15\mu m$ y 3 grados de campo (diámetro), lo que proporciona un valor nominal de *Etendue* de 34,7, que es un factor 5-10, al menos, superior al de los telescopios existentes. En ese sentido es único y el primero en su género. Además, hay otro aspecto a considerar para calibrar la magnitud del esfuerzo y la necesidad de un planteamiento adecuado. Normalmente el acceso a los telescopios se distribuye entre diferentes proyectos, de modo que cada uno de ellos dispone de una pequeña fracción del tiempo, digamos algunas noches por año. Incluso proyectos especiales suelen tener una fracción que rara vez supera el 10% del total, llegando muy excepcionalmente al 30%. De modo que la capacidad nominal, dada por la *Etendue*, tiene que ser modulada a la baja por el tiempo que realmente se va a dedicar a un proyecto determinado. En el caso del telescopio de Javalambre, cada proyecto, producto de amplias colaboraciones y definido sobre criterios científicos, con una duración típica de varios años, ocupará todo el tiempo útil hasta su compleción, contando así con toda la potencialidad de los instrumentos.

El Observatorio de Javalambre se completará con otro telescopio de 80 cm de apertura y 1.7 grados de campo (diámetro) que se usará como auxiliar, para tareas de calibración y para otros

proyectos científicos. Y, por supuesto, con las instalaciones e infraestructuras necesarias para su funcionamiento (Figura 11).

Los telescopios contarán con cámaras CCD de gran formato como instrumentos de plano focal. La cámara para el telescopio de 2.5 m es particularmente compleja pues debe cubrir un campo de $47,2$ cm de diámetro. Se contempla la opción de montar un mosaico de *chips*, en principio un total de 14 de gran formato (110 millones de píxeles cada uno). Para el telescopio auxiliar la cámara contendrá un solo chip, similar a los anteriores.

Antes de finalizar, quizás sea conveniente dar, aunque sea brevemente, las razones por las que se ha escogido el Pico del Buitre, municipio de Arcos de las Salinas (Teruel), en la vertiente SE de la Sierra de Javalambre, para instalar nuestro Observatorio. Hay que comenzar diciendo que este lugar ya fue identificado hace casi 20 años como de gran calidad, a partir de un análisis general de las condiciones para la Astronomía en la península Ibérica. Por aquel entonces, el estudio del lugar se vio interrumpido por diferentes avatares y sólo fue posible tomar algunas medidas que, si bien no eran estadísticamente concluyentes, claramente indicaban que se trata de un lugar de alta calidad. Una vez que el proyecto de construir un Observatorio en Javalambre fuera positivamente reconsiderado en 2007, las medidas efectuadas a partir de Marzo de 2008, con instrumentos y monitores adecuados y homologados confirman que se trata de un lugar con grandes condiciones por la transparencia de la atmósfera, la oscuridad del cielo, el número de noches disponibles para la observación y la calidad de imagen (*seeing* en el lenguaje astronómico), que le sitúan en el primer nivel entre todos los conocidos (Figura 12).

El OAJ forma parte del Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón, CEFCA (<http://www.cefca.es>), que fue implementado a finales de 2008 y que es el primer

Figura 10. Ilustración de las diferencias características de telescopios de campo grande y menor tamaño, frente a grandes telescopios de pequeño campo. El fondo es una imagen del *Hubble Deep Field*.

“ Se conoce como *Etendue* el producto del área colectora de un telescopio (en m^2) por el campo de visión (en grados cuadrados). ”

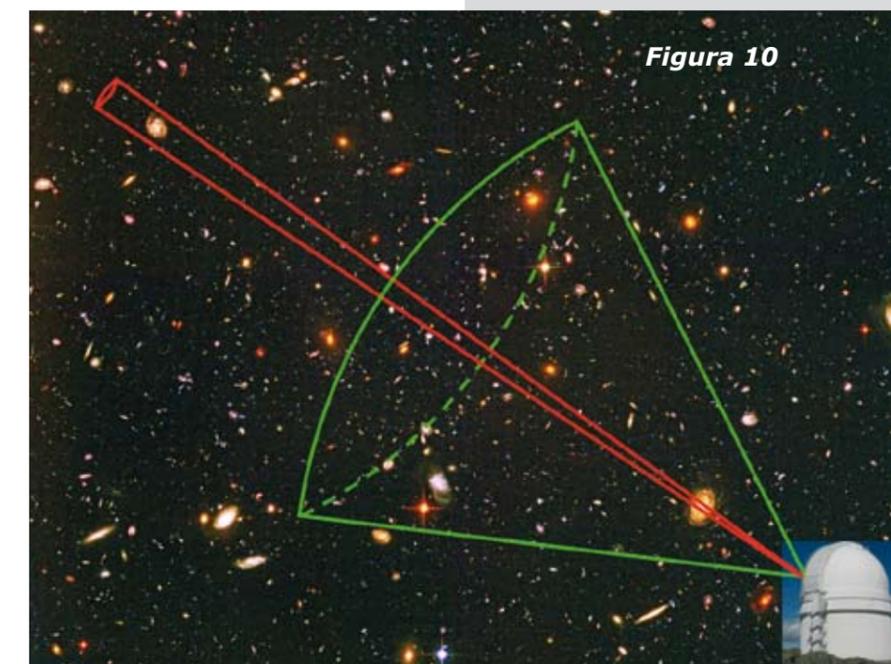
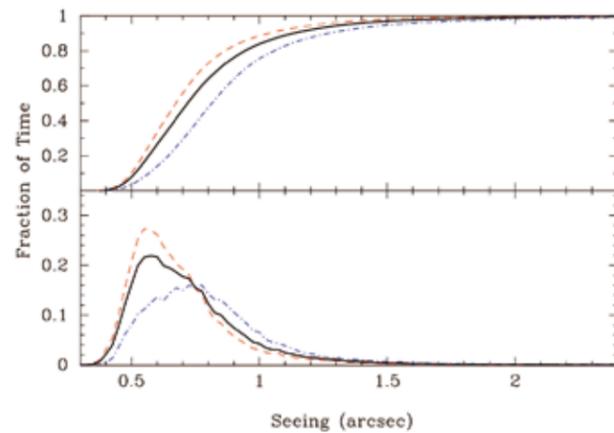


Figura 10

centro de investigación dedicado a la Astrofísica en Aragón. Su objetivo es precisamente la construcción del OAJ y la explotación científica de los datos que se generen. En este momento, el proyecto está completamente definido y se halla en fase de licitación. La previsión es que la firma del contrato pueda hacerse antes de finales de Enero 2010. A partir de dicha firma, los plazos para tener los telescopios instalados son de 12 meses para el telescopio auxiliar y de 105 semanas para el telescopio de 2.5 m. Una vez verificados y puestos a punto se inicia-



rá el primer cartografiado, el *Javalambre-PAU Astrophysical Survey*, al que ya hemos aludido anteriormente.

Además del reto que supone la construcción de los telescopios, con sus cámaras, y el Observatorio, nos enfrentamos a otro problema de considerables proporciones, el de la transmisión y tratamiento del enorme volumen de datos que se va a generar. Se prevé que, entre los dos telescopios, se produzca un total de 1,5 Terabytes de datos por noche de observación. Estos datos serán enviados al CEFGA (Teruel) en tiempo real para que allí sean primero validados y luego tratados, calibrados y analizados para extraer la información requerida. Los datos, una vez terminado ese proceso, serán archivados y puestos a disposición de la comunidad internacional. El

archivo final de ese primer cartografiado podría contener, incluidas las imágenes, por encima de 1 Petabyte de datos. Para hacer frente a este reto se contempla, en la planificación del CEFGA, la creación de la Unidad de Procesado y Archivo de Datos, UPAD, que tendrá la responsabilidad de todo el proceso de datos, desde el almacenamiento en el OAJ y su transmisión a la sede del CEFGA en Teruel, hasta la construcción de las "pipelines" de tratamiento, la constitución del Archivo y el servicio a la comunidad para que pueda acceder a ellos.

El CEFGA es, como hemos indicado, el primer centro de investigación específicamente dedicado a la Astrofísica en Aragón. Por otro lado la actividad investigadora en nuestra Comunidad en algunas ramas de la Astrofísica, en particular en Cosmología, es bien conoci-

“ El Pico del Buitre fue identificado, hace casi veinte años, como de gran calidad, a partir de un análisis general de las condiciones para la Astronomía en la Península Ibérica. ”

da. Pretendemos que el proyecto que encarna el CEFGA con el OAJ impulse la creación de un foro científico alrededor de problemas centrales de Física y Astrofísica, capaz de atraer a todos los científicos interesados y a estudiantes que pretendan iniciar una carrera de investigación en las líneas que el avance de la Astrofísica ha abierto. El proyecto, una vez completado el Observatorio Astrofísico de Javalambre, representa una magnífica oportunidad de investigación y desarrollo instrumental para, contando con esa nueva ventana al Universo de la que dispondremos en el Pico del Buitre, proponer las colaboraciones y proyectos necesarios para dar respuesta a los retos científicos que los desarrollos de los últimos decenios han planteado.

Mariano Moles

Director del Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón Teruel

Figura 11. Boceto del Observatorio de Javalambre. El proyecto está en fase de licitación. Se pueden ver las dos cúpulas de los telescopios de 2.5m y 80cm de apertura, y los diferentes edificios.

Figura 12. Distribución diferencial (figura inferior) e integral (figura superior) de los valores medidos de seeing en el Pico del Buitre. La línea media es el promedio, mientras que las azul y roja corresponden a verano e invierno, respectivamente. Datos tomados desde Marzo/2008 hasta Septiembre/2009. El valor mediano de la distribución es 0.70". En la figura superior puede constatar que el valor de seeing es inferior a 0.8" en el ~70% de los casos. También se ha estudiado la estabilidad del seeing, encontrando que se mantiene estable en escalas típicas de 5 horas. Estos valores colocan al Pico del Buitre entre los mejores conocidos.



Figura 11



mi **DESPACHO**

Desde el año 2002, cuando empecé mi tesis doctoral bajo la dirección del Profesor José Luis Alonso, el Departamento de Física Teórica de la Universidad de Zaragoza en la Facultad de Ciencias ha sido mi segunda casa. Aunque, a decir verdad, si alguien se hubiera tomado el extraño trabajo de llevar contabilidad de la horas que he pasado en el Departamento y en mi vivienda particular, quizás descubriríamos que la anterior frase hecha no es precisa y debería haber escrito “primera casa” antes del punto y seguido.

Antes que doctorando, fui estudiante (claro) de Física en esta misma Facultad y me beneficié no sólo de la excelente formación que aquí se proporciona, sino también del agradable ambiente académico que se respira en sus pasillos. Tuve, asimismo, la suerte de hacer unos cuantos muy buenos amigos con los que aún mantengo relación y con alguno de los cuales incluso he llegado a colaborar científicamente en la etapa en que la investigación empezó a robar parte de mis horas (inunca todas!) al estudio.

POR PABLO ECHENIQUE

Durante la carrera, no puedo decir que habitase (en primer o en segundo grado) en la Facultad de Ciencias, ya que los estudiantes son más bien una especie de nómadas, que van de aula en aula, de laboratorio en laboratorio y, a veces, acampan en la plaza del estanque. A medida que íbamos avanzando de curso, sin embargo, ese sentimiento de que uno está en casa se iba haciendo más fuerte, aunque la casa fuera muy grande, con un hall con grandes columnas, con un montón de habitaciones en las cuales no hubiéramos entrado, con conserjes y aula magna.

He de decir que nunca me encontré a disgusto durante mi época de estudiante. Aunque la Facultad de Ciencias, como el resto del mundo, sea un lugar diseñado pensando en la gran mayoría de sus usuarios (pero no en todos), y mi minusvalía concreta me sitúe fuera de esta paradigmática mayoría. Lo cierto es que, por un lado, uno acaba por acostumbrarse a inventar trucos que permitan moverse por terrenos agrestes y, por el otro lado, cuando me quedaba sin trucos, siempre había alguien entre mis compañeros para echarme una mano.

Cuando decidí (sin dudarle ni un momento) que quería hacer una tesis y meterme en la carrera investigadora, estuve buscando "piso" durante un tiempo hasta que encontré una habitación

compartida con otros ilusionados aprendices de físico en el antiguo pasillo del Departamento de Física Teórica, con sus armarios de madera y sus letras de metal en la puerta. En ese momento, mi residencia en la Facultad se hizo permanente y empecé a descubrir que no sólo la formación era excelente, sino también la investigación que se hacía entre sus muros; que no sólo los estudiantes eran amables, sino también los profesores, los secretarios, los conserjes y las señoras de la limpieza; y empecé a descubrir que, en realidad, todo era la misma cosa.

Los años de doctorado fueron muy interesantes y muy fructíferos. José Luis Alonso, como Vito Corleone en la película, me hizo una propuesta que no pude rechazar y me uní a él en la emocionante aventura de aplicar las potentes herramientas conceptuales y matemáticas propias de la física a los nuevos sistemas complejos que son, cada día más, el objeto de estudio de una ciencia cada vez más colaborativa e interdisciplinar. La familia de sistemas elegida fue la de las proteínas y el problema a estudiar: su proceso de plegamiento. Tuve que aprender biología, bioquímica, química y estadística, y descubrí que la existencia de buenos investigadores no era patrimonio del Departamento de Física Teórica, ámbito en el que, hasta entonces, me había movido. Muchos profesores de la Facultad me

“El objetivo de una adaptación no es el de convertir en posible algo que antes era imposible.”

echaron una mano y también tuve la suerte de participar del estupendo ambiente del Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos (BIFI, para los amigos), que nació más o menos cuando nació yo como investigador.

Durante la época de doctorado, ya no tenía compañeros de clase que me ayudasen cuando me quedaba sin trucos, pero tenía compañeros de despacho, tenía a los profesores del departamento, a los secretarios, a los conserjes y, prontito por la mañana, a las señoras de la limpieza que, a veces, me ayudaban abriéndome la puerta del despacho y, a veces, me "desayudaban" moviéndome las cosas de mi mesa, pero siempre con buena voluntad. Sólo en unos pocos casos concretos, a horas no muy concurridas, me encontraba solo en el departamento y mis movimientos estaban limitados un rato hasta que aparecía alguien.

Cuando leí mi tesis y me convertí en un flamante doctor (un proceso bastante indoloro, aunque arduo), obtuve un contrato postdoctoral del MEC (no había MICINN entonces) y decidí quedarme en Zaragoza por comodidad logística. Aunque mi contrato estaba adscrito al BIFI, como otros miembros del instituto, consideré conveniente mantener mi residencia en el Departamento de Física Teórica. La logística fue el factor determinante de nuevo, ya que el acceso al edificio del BIFI en la calle Corona de Aragón era (y es), cuando menos, "complejo". Una vez instalado (si se me permite usar la palabra, ya que en realidad no tuve que mover ni un lápiz) y un poco más relajado después de la tesis, me

levanté un día y se me ocurrió la idea de adaptar mi despacho. Éste es precisamente el tema de el artículo que me he propuesto escribir, aunque lleve unas páginas divagando... perdón, contextualizando.

Antes de proseguir, me voy a permitir el lujo (aprovechando el foro que se me brinda) de hacer un poco de pedagogía respecto del concepto de "adaptación", ya que me consta que existen una serie de malentendidos y simplificaciones muy extendidos, fruto de la más que justificable circunstancia de que no todo el mundo ha vivido en contacto cercano con una persona minusválida.

En primer lugar, quiero subrayar que *una buena adaptación ha de ser personalizada*. Las minusvalías son de muchísimos tipos distintos y de muchísimos grados, y es completamente imposible diseñar una infraestructura que abarque todos los déficits funcionales que se pueden presentar. Esto que digo es, por un lado, bastante obvio: basta con pensar en cualquier tipo de infraestructura "normal" que ni siquiera abarca a todas las personas *sin minusvalía* a las que se supone que va dirigida: personas bajitas que no llegan a la estantería más alta de un supermercado, personas con sobrepeso que no caben bien en las butacas de un cine o en los pasillos de un avión, personas mayores que no pueden subir a un quinto sin ascensor, y podría estar así hasta cansarme. Por otro lado, aunque se trate de una afirmación obvia, es algo digno de subrayar, si pensamos que la etiqueta "adaptado" se estampa sobre un montón de cosas hoy en día, sin fijarse más que en la cobertura mediática, o en poder poner una cruz en determinado formulario que quizás, y no quiero ser mal pensado, conduzca a una subvención. Cuando nos dicen que un hotel está "adaptado" significa que tiene ascensor y un par de habitaciones con puertas más anchas y un asa de metal en la pared del lavabo. Cuando nos dicen que un autobús está "adaptado", significa



que tiene el suelo bajo y una rampa para entrar. Cuando nos dicen que un cine está "adaptado", significa que han quitado una butaca o dos, normalmente en un sitio bastante malo. Está claro que estas mejoras hacen que la infraestructura sea accesible a un conjunto más amplio de personas que antes (o simplemente que su uso sea más sencillo), y eso está muy bien, pero en ninguno de los casos significa que la infraestructura en cuestión sirva para todo el mundo. Como digo, la (buena) adaptación, la adaptación de pata negra, es personalizada.

En segundo lugar, me gustaría dejar claro que el objetivo de una adaptación no es el de convertir en posible algo que antes era imposible. Realmente, hay muy pocas cosas que una persona minusválida no pueda hacer. Casi todo se puede hacer... si se dispone de la ayuda de un cierto número de personas en buenas condiciones físicas: yo no llego al botón de la luz pero, si hay alguien cerca, sólo tengo que pedirle que le dé y acabo de solucionar el problema. Del interruptor de la luz al vuelo parabólico del que disfrutó el físico Stephen Hawking (iroprietario de una minusvalía muy severa y que vivió esta aventura con más de 60 años!), pasando por la gran mayoría de las actividades de la vida cotidiana, casi todo se puede hacer si una persona (o más de una) nos echa una mano. Como digo, el objetivo de una adaptación no es el de permitir que la persona minusválida pueda hacer algo que antes no podía hacer, sino el de permitir que lo pueda hacer sin ayuda de terceras personas, a veces por puro placer y tantas veces como le dé la gana. Si te parece, amigo lector, que esto es un lujo, imagina durante un minuto cómo sería tu vida si tuvieras que pedir ayuda para realizar la mayoría de

tareas que llevas a cabo durante el día... y piénsalo de nuevo. No te costará mucho llegar a la conclusión de que la independencia es un valor en sí mismo y una condición necesaria para llevar una vida plena y sana.

Con estas "revolucionarias" (estoy siendo sarcástico aquí) ideas en mente, y habiendo agotado ya mi cuota de pedagogía, volvamos al mucho más modesto relato de la adaptación de mi despacho en la Facultad de Ciencias.

La idea original fue que, como algún día podría querer comprarme un piso propio y adaptármelo a mi gusto, y como no tenía mucha idea yo en ese momento qué tipo de adaptaciones eran posibles tecnológicamente y cómo de útiles me podrían resultar, me podía venir muy bien realizar una prueba a escala más pequeña, en el ámbito más acotado de una sola habitación, o sea, en mi despacho. De paso, mi comodidad en el lugar de trabajo podría aumentar algunos enteros aunque, como digo, nunca fue escasa.

Mi primer movimiento fue buscar las soluciones tecnológicas apropiadas, y pronto di con la empresa BJ Adaptaciones, radicada en Barcelona y dirigida por los hermanos Joaquín (la J) y Borja (la B) Romero (querían poner a Joaquín primero, pero JB Adaptaciones sonaba a otra cosa). El estupendo sistema integrado de control de en-

torno diseñado por los hermanos Romero no es sólo producto de su buen hacer y de su creatividad, también se nota en su inteligente diseño, el hecho de que Joaquín, con una minusvalía importante, forma parte del conjunto de clientes de su propia empresa. No hay más que mirar el vídeo que hay en la web de BJ (<http://www.bj-adaptaciones.com>), en el que el propio Joaquín nos enseña el piso adaptado por ellos mismos y en el que él vive solo, para darse cuenta de lo lejos que se puede llegar con un poco de electrónica y un mucho de reflexión bien orientada.

Con la parte técnica ya solventada, decidí ponerme en contacto con los órganos de gobierno de la Universidad para empezar a explorar los aspectos económicos y administrativos del asunto. Aunque la cosa llevó su tiempo, dado que nunca se había realizado un proyecto similar, he de decir que, desde José Luis Dolz, quien fue mi primer contacto y que estaba en ese entonces en el Servicio de Ergonomía, pasando por Fernando Latorre, quien se ocupó de muchos de los pasos intermedios, y finalizando en la excelente gestión de Ana Mojares, desde la Oficina de Atención a la Discapacidad, creada en algún momento durante este proceso, todo fueron facilidades y jamás hubo el más mínimo problema. Vaya para todos ellos, para alguna persona que seguramente me he dejado, y para la Facultad de Ciencias y el Departamento de Física Teórica, que me dieron permiso para "retocar" mi despacho un segundo y medio después de que lo pidiera, mi más sincero agradecimiento.

Después de la aprobación vinieron las obras. Dado que BJ Adaptaciones acababa de abrir sucursal en Zaragoza, esta fase también fue despacio, pero, poco a poco, y con el buen hacer de Ángel Asensio, encargado de dirigir la división aragonesa de la empresa, fuimos poniendo, uno a uno, todos los sistemas en marcha. Después de analizar el problema entre los dos largo y tendido, decidimos adaptar la puerta del despacho, una de las hojas de la ventana, la persiana, la luz, el aire acondicionado, el teléfono y uno de los enchufes de la pared. Una de las ventajas

del sistema BJ es que es completamente modular, de manera que, si en un futuro quisiera agregar o quitar alguna funcionalidad, no habría que modificar ninguno de los demás elementos. El sistema funciona por radiofrecuencia, así que tampoco hubo que poner muchos cables en el despacho. Todos los elementos se controlan desde un mismo mando a distancia programable, así como desde un programa de ordenador que actúa sobre un emisor de radiofrecuencia enchufado a un puerto USB. Realmente, BJ dispone de un gran número de controladores para todo tipo de minusvalías, pero, en mi caso, con el mando a distancia y la aplicación informática, fue suficiente. Otro de los puntos a tener en cuenta fue que yo no estoy solo en el despacho, sino que lo comparto con otra persona, así que todas las adaptaciones tuvieron que realizarse de manera que pudieran ser operadas de manera dual, tanto por mí como por mi compañero de despacho. En el vídeo que grabé con mi amigo Álvaro Rigual y con el cual la adaptación del despacho ganó el premio Romper Barreras 2008 (<http://www.premiosromperbarreras.es/participantes-2008-1.html>) se puede apreciar cómo funcionan todos los elementos instalados, aunque es una lástima que YouTube le haya quitado el sonido por motivos de derechos de autor; la música sería "robada", pero quedaba francamente bien.

En mi lugar de trabajo, sigo necesitando la asistencia de terceras personas para muchas cosas (gracias, José Luis, Pedro, Esther, Víctor, ...), pero la verdad es que me encuentro bastante más cómodo que antes. ¡Tanto que a veces me descubro en casa (donde aún no dispongo de ninguna adaptación) con unas ganas intensas de ir a hacer cosas a mi despacho! Y me preocupó, claro.

Pablo Echenique

Dpto. de Física Teórica
Instituto de Biocomputación
y Física de los Sistemas Complejos
Universidad de Zaragoza



MATEMÁTICAS, ¿PURAS O APLICADAS? El caso de la Geometría proyectiva

POR FERNANDO ETAYO

INTRODUCCIÓN

Una controversia larga en el tiempo es la de la aplicabilidad de las Matemáticas. Opiniones contrarias y tajantes se han sucedido a lo largo de la historia. Así, por citar sólo una, Hardy escribía, en su "Apología de un matemático"¹: *el estudio de las matemáticas es, si bien poco útil, una ocupación perfectamente inocente e inocua*. Más adelante continuaba: *Hay una conclusión tranquilizadora y fácil para un matemático auténtico. Las matemáticas auténticas no tienen efectos sobre la guerra. Nadie ha descubierto todavía ninguna aplicación militar de la teoría de números y de la relatividad, y no parece probable que alguien lo haga en muchos años*. Estas palabras, escritas el año 1940 demuestran que Hardy no tenía precisamente visión profética.

La primera cuestión es la relación existente entre el "mundo real" y el mundo matemático. Existe una concordancia muy grande entre ambos, como señalaba Eugene Wigner en 1963, en su obra: "La irrazonable efectividad de las Matemáticas en las Ciencias Naturales": *El milagro de la adecuación del lenguaje de las matemáticas para la formulación de las leyes físicas es un don maravilloso que ni entendemos ni merecemos. Deberíamos mostrarnos agradecidos por él y esperar que permanezca siendo válido en la investigación futura y que se extienda, para bien o*

Matemáticas, ¿puras o aplicadas?

El caso de la geometría proyectiva

para mal, para placer nuestro, aunque también tal vez para nuestra perplejidad, a ramas más amplias del saber. Estas palabras fueron respondidas por Gelfand, cuando escribió: *Eugene Wigner escribió un famoso ensayo sobre la irrazonable efectividad de las Matemáticas en las Ciencias Naturales. Él quería decir en la Física, por supuesto. Sólo una cosa es más irrazonable que la irrazonable efectividad de las Matemáticas en la Física, y es la irrazonable falta de efectividad de las Matemáticas en la Biología.* La utilización de las técnicas matemáticas en el estudio del genoma, por citar un ejemplo de actualidad, revela nuevamente que el don profético no abunda entre quienes filosofan sobre estos temas². Así que, querido lector, no me lo pidas a mí. Mi discurso será mucho más pegado a la tierra, o a la pizarra, por mejor decir.

Una característica señalada por muchos autores es la del *placer estético de las Matemáticas* (así justamente se titula un libro³ de Serge Lang) y la del desafío intelectual: igual que el hombre buscó las fuentes del Nilo, llegar al Polo Norte o subir al Everest, ansía descifrar los enigmas que se alzan ante él en su devenir por las Matemáticas. Jacobi, en 1830 escribía que *el único objetivo de la Ciencia es el honor del espíritu humano, y siendo así, una cuestión referente a la teoría de números es tan valiosa como otra que se refiera al sistema del mundo.* Dieudonné, tituló su libro⁴ de 1987 con esa frase de Jacobi, *en honor del espíritu humano.*

Como decía, me voy a centrar en un ejemplo para, a partir de él, poder sacar alguna conclusión. El ejemplo es el de la Geometría Proyectiva. Antes de describirlo, pensemos en dónde la situarían diferentes personas.

- Un ingeniero de la vieja escuela quizá nos diría que es una parte de la Geometría Descriptiva, que trata de la representación plana de los objetos del espacio tridimensional.

- Cayley nos diría, bueno, nos dijo, que *la Geometría Proyectiva es toda la Geometría.*
- Un alumno del modelo bourbakista de las matemáticas, como tuvo mi generación, diría que es un objeto abstracto de Matemática Pura (un espacio cociente de un espacio vectorial).
- Un ingeniero informático que se dedique a la reconstrucción de imágenes por ordenador usará, casi con total seguridad sin saberlo, resultados de Geometría Proyectiva.

¿Es Matemática Pura o Aplicada la Geometría Proyectiva?

UN PASEO POR LA HISTORIA

Vamos a ver muy sucintamente cómo ha evolucionado la Geometría Proyectiva, desde sus orígenes hasta nuestros días. Más que los resultados muy notables que ha dado, queremos resaltar las relaciones con otras disciplinas y las ideas que han movido su estudio y su evolución.

La Geometría Proyectiva nació cuando se trató de dibujar fielmente lo que se veía⁵. Dicho con palabras modernas, se buscaba el modelo matemático que explique tal representación fiel de la realidad visual. Se puede decir que Alberti (1404-1472) en su tratado sobre la Pintura de 1435 formula las preguntas precisas:

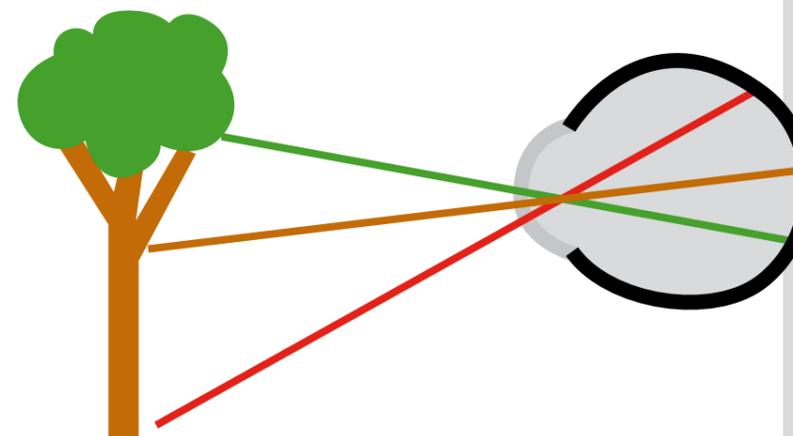
- *¿Qué se conserva por proyección, si no lo hacen ni la longitud ni los ángulos?*
- *¿Qué relación hay entre dos secciones de la misma figura?*
- *¿Cuáles son las propiedades comunes a dos secciones cualesquiera?*

Estas preguntas son de naturaleza plenamente matemática. Poco tiempo después, Brunelleschi (1377-1446) enuncia los llamados "experi-

mentos" que dan apoyo teórico a lo que se estaba consiguiendo ya dibujar con corrección. El primer experimento se pregunta cómo se puede saber si un cuadro tiene buena perspectiva. La respuesta es si lo retratado en el cuadro se puede prolongar fuera de éste coincidiendo con lo que se ve en la realidad (la manera de exponerlo era más complejo, usando un espejo) En Durero (1471-1528) encontramos deliciosas ilustraciones de los principios de la perspectiva:



Cuando vemos por nuestro ojo...



...la aplicación matemática que estamos definiendo se denomina *proyección cónica*. Proyectamos el espacio tridimensional que nos rodea sobre una superficie bidimensional (la retina, el lienzo del cuadro, la película fotográfica). Las preguntas de Alberti requieren que construyamos el *modelo ma-*

1. **G. H. Hardy:** *Apología de un Matemático*, Ed. Nivola, 1999.
2. **I. M. Gelfand** (1913-2009), autor de más de 800 artículos de investigación y una treintena de libros, fallecido el pasado 5 de octubre, realizó importantes aportaciones en muchas ramas de las Matemáticas. Dedicó atención, en particular, a la Biología teórica y experimental, y fue uno de los creadores del Instituto de Biología Física dentro de la Academia de Ciencias de la URSS. Por eso sus palabras deben tomarse con la autoridad de quien las pronunció.
3. **S. Lang:** *El placer estético de las matemáticas*, Alianza Universidad, 1984.
4. **J. Dieudonné:** *En honor del espíritu humano. Las matemáticas hoy*, Alianza Universidad, 1989.
5. Existe una bibliografía muy amplia sobre el tema. Citemos los siguientes libros:
 - J. L. Coolidge:** *A History of Geometrical Methods*, Dover, 2003
 - H. Damisch:** *El origen de la perspectiva*. Alianza Ed., 1997.
 - W. M. Ivins, Jr.:** *Art and Geometry. A study in space intuitions*. Dover, 1964.
 - M. Kemp:** *La ciencia del arte. La óptica en el arte occidental de Brunelleschi a Seurat*. Ed. Akal, 2000.
 - D. Pedoe:** *La Geometría del Arte*. Ed. Gustavo Gili, 1979.
 - L. da Vinci:** *Tratado de la Pintura*. Ed. Akal, 2007.
 - H. Wölfflin:** *Conceptos fundamentales de la Historia del Arte*. Ed. Optima, 2002.
 - S. Woodford:** *Cómo mirar un cuadro*. Ed. Gustavo Gili, 2004.

Matemáticas, ¿puras o aplicadas? El caso de la geometría proyectiva

temático subyacente. Ese modelo es la Geometría Proyectiva, que no resulta sencillo de explicar en pocas palabras: a la Humanidad le costó hasta mediados del XIX, es decir, cuatro siglos, para entenderlo bien, y uno más para explicarlo como hoy lo hacemos, usando Álgebra Lineal.

Un poco de historia⁶:

Desde el punto de vista matemático, se suele considerar que los fundadores fueron los geómetras franceses **Gérard Desargues** (1591-1661) y Blaise Pascal (1623-1662). La geometría de Desargues es una geometría sin círculos, distancias, ángulos, mediatrices ni paralelismos. La labor de Desargues fue seguida solamente en su época por Pascal. Los resultados más célebres que obtuvieron se refieren a configuraciones de rectas.

Contemporáneo de ambos fue **Descartes** (1596-1650). La geometría cartesiana se presenta como un edificio formidable: al dotar de coordenadas a los puntos del plano puede apoyarse en el álgebra para encontrar ecuaciones de curvas y obtener nuevas propiedades. Históricamente es un paso crucial, el mayor avance desde la geometría de los griegos. La aparición del cálculo diferencial e integral con **Newton** (1642-1727) y **Leibnitz** (1646-1716) dotó a la geometría analítica de Descartes de todas las herramientas de álgebra y análisis. La Geometría Proyectiva como parte de las Matemáticas dejó de cultivarse. Sin embargo, continuó el estudio de la Geometría Proyectiva como parte de la Geometría Descriptiva, esto es, para realizar Dibujo Técnico.

Al finalizar el siglo XVIII comenzó a brillar en Francia una escuela geométrica de gran valor. Su promotor fue **Gaspard Monge** (1746-1818). Profesor de la Escuela Po-

litécnica de París, autor de un célebre tratado de *Geometría Descriptiva* en el que sienta las bases del sistema diédrico de representación; fue capaz de crear una magnífica promoción de geómetras, alumnos suyos: **Brianchon** (1785-1823); **Poncelet** (1778-1867), el verdadero artífice del redescubrimiento de la Geometría Proyectiva, autor de *Traité des propriétés projectives des figures*, que se publicó en 1822, y que pasó a ser el artículo fundacional de la disciplina.; **Gergonne** (1771-1859), **Chasles** (1793-1880), continuador de la obra de Poncelet y redescubridor de la obra de Desargues, lo que permitió enlazar los orígenes de la Geometría Proyectiva en el siglo XVII con los avances del XIX.

Estos autores, y otros que no cito, hicieron progresar la Geometría Proyectiva como disciplina propia dentro de las Matemáticas, y obtuvieron resultados que la alejan del interés exclusivo por los problemas de perspectiva. De modo muy simple y general, se puede decir que desde mediados del siglo XIX Alemania tomó el relevo a Francia, ocupando el lugar central de la geometría durante un siglo. Debemos citar los nom-

“
La geometría cartesiana se presenta como un edificio formidable... Históricamente es un paso crucial, el mayor avance desde la geometría de los griegos.
”

bres de **Steiner** (1796-1863), **Plücker** (1801-1868), **Möbius** (1790-1868) y **von Staudt** (1798-1867) que fue muy relevante en su momento, porque consiguió definir la *razón doble*⁷, que es el principal invariante proyectivo, sin utilizar la noción de distancia.

Mientras, el inglés **Cayley** (1821-1895) se dedicó a estudiar profundamente la geometría proyectiva con el empleo de coordenadas y **Laguerre** (1834-1866) obtiene las fórmulas para distancias y ángulos de la geometría euclídea considerada dentro de la proyectiva. Esto es conceptualmente muy importante, porque convierte a la Geometría Proyectiva en la más general de todas las geometrías. Para entender las diferentes geometrías, pensemos en sus movimientos o transformaciones planas, de más general a más particular:

- Los movimientos de la Geometría Proyectiva son las aplicaciones proyectivas. Conservan las alineaciones (puntos alineados se transforman en puntos alineados) y las razones dobles.
- Los de la Geometría Afín son las afinidades. Además de las propiedades anteriores conservan razones simples y paralelismo de rectas.
- Los de la Geometría Equiforme son las semejanzas: giros, traslaciones y homotecias. Conservan además de las precedentes los ángulos.
- Los de la Geometría Afín Euclídea (la que se estudia en la etapa escolar), son los giros y las traslaciones. Se conservan, además de todas las propiedades precedentes, las distancias.

6. En muchos libros de historia de las matemáticas pueden encontrarse los datos aquí contenidos. De los autores que se citan puede hallarse amplia información biográfica en la hoja web:

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/index.html>

7. La razón doble de cuatro puntos alineados se define como cociente de dos razones simples (de ahí su nombre): $[a,b,c,d] = (a,c,d) : (b,c,d) = \{(c-a)/(d-a)\} : \{(c-b)/(d-b)\}$. Es difícil explicar por qué es un invariante proyectivo.

8. Las geometrías hiperbólicas fueron introducidas por Lobachevski, Bolyai (padre e hijo) y Gauss entre 1820 y 1830 y supusieron una verdadera conmoción, porque se planteó la cuestión de qué geometría es la del Universo físico. A este respecto es muy curioso señalar cómo Bertrand Russell en 1897 abordaba el problema de la Geometría "real", dando como solución que ésta era la proyectiva, en el sentido de que abarcaba a la euclídea y a la hiperbólica. Además, intuía que la teoría de variedades de Riemann, muy difícil de entender, nunca pasaría de ser una mera elucubración sin futuro. Otra vez la visión profética equivocada. Sin embargo, el libro es muy interesante porque está escrito con gran cercanía a la obtención de los resultados mencionados. Véase: **B.**

Russell: An Essay on the Foundations of Modern Geometry, reeditado por Dover, 2003.



Descartes
(1596-1650)

Matemáticas, ¿puras o aplicadas?

El caso de la geometría proyectiva

Habíamos comentado al principio que la motivación estética es muy importante en las Matemáticas. El resultado anterior, denominado a veces estratificación de las geometrías, los matemáticos lo encontramos bello. En su momento era eso, un bello resultado. En el siglo XX será un ingrediente esencial para poder realizar la reconstrucción de imágenes por ordenador.

Para colmo, en 1871 **Klein** (1849-1925) le comunica a Cayley que las geometrías no euclídeas de tipo hiperbólico se pueden expresar en función de la geometría proyectiva. Con todos estos antecedentes, exclama Cayley la frase que habíamos ya citado: **La Geometría Proyectiva es toda la Geometría**⁸. La concepción de las geometrías como la teoría de los invariantes de la acción de un grupo sobre un espacio es la contenida en el célebre *Programa de Erlangen de Klein*.

En el siglo XX se produce una nueva revolución en la Geometría Proyectiva: al introducirse los espacios vectoriales, se presenta una nueva definición (equivalente a las anteriores) del espacio proyectivo como conjunto de rectas de un espacio vectorial de dimensión una unidad superior. Entra entonces el Álgebra Lineal con todo su aparato, simplificando muchas demostraciones y cálculos. La Topología también se desarrolla y convierte a los espacios proyectivos en objetos de su estudio. Lo mismo ocurre con otras disciplinas matemáticas. Es especial-

mente importante el caso de la Geometría Algebraica (que estudia las variedades determinadas por ecuaciones polinómicas) cuyo marco natural está dado por el espacio proyectivo.

La aportación española:

El siglo XIX la ciencia española, y la matemática en particular, estaban muy alejadas de la primera línea de investigación. Los estudios de Matemáticas sólo se podían cursar en las universidades de Madrid, Zaragoza y Barcelona (situación que permaneció hasta los años sesenta del siglo XX). Sin embargo, tampoco era un absoluto desierto. La geometría de Staudt fue pronto enseñada en España. A finales del siglo XIX se edita la primera revista matemática, *El Progreso Matemático*, en la Universidad de Zaragoza, por el afán del Profesor **García de Galdeano**. A principios del siglo XX se constituiría la Sociedad Matemática Española y las primeras generaciones de matemáticos españoles irían a recibir formación para su doctorado a otros países europeos, principalmente a Alemania.

Centrándonos en el caso de la Geometría Proyectiva hay que destacar el caso de **Reyes y Prósper** (1863-1922), que desde su recóndita posición de profesor de instituto en varias capitales (Albacete, Jaén, Cuenca y, fundamentalmente, Toledo) mantuvo correspondencia científica con autores de la talla de Klein o Pas-

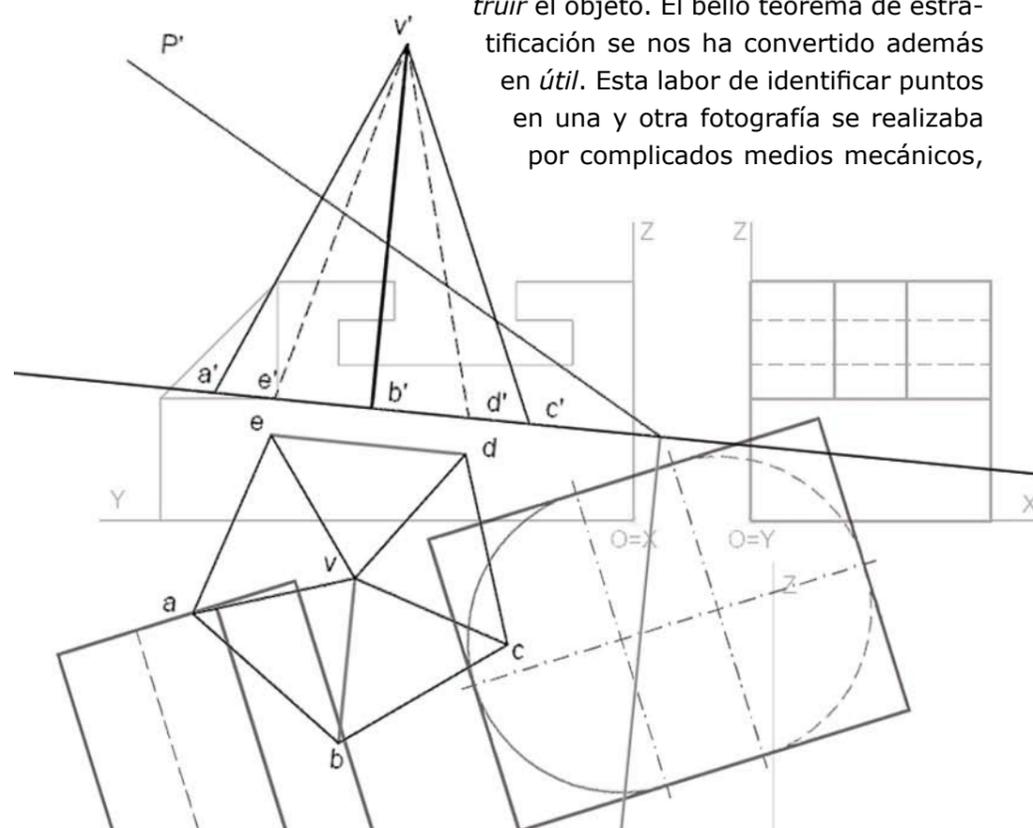
“ En su momento era eso, un bello resultado. En el siglo XX será un ingrediente esencial para poder realizar la reconstrucción de imágenes por ordenador. ”

ch, publicó en los años 1887 y 1888 sendos artículos en los *Mathematischen Annalen* alemanes sobre geometría proyectiva y en la Universidad de Kazán (Rusia) uno sobre geometrías no euclídeas (en esta universidad había desarrollado su actividad Lobachevski).

La fotogrametría y la reconstrucción de imágenes por ordenador:

Vamos a citar este tipo de aplicación, porque es el más ligado al desarrollo histórico que hemos presentado. La fotogrametría, que comenzó a mediados del siglo XIX, y la visión por computador, de segunda mitad del XX, tienen un planteamiento común entre sí y común con nuestra visión binocular: a partir de dos imágenes diferentes de un mismo objeto ser capaces de reconstruir las verdaderas proporciones del objeto.

Una imagen se obtiene realizando una proyección cónica, que es una aplicación proyectiva y, por tal, conserva alineaciones y razones dobles, pero no razones simples, ni ángulos, ni distancias. ¿Cómo, pues, a partir de dos imágenes se va a poder reconstruir las proporciones de un objeto, esto es, los ángulos y el tamaño relativo de sus lados? Hallando las coordenadas de ocho puntos en cada una de las dos fotos, y teniendo en cuenta la estratificación de las geometrías antes mencionada, se consigue *reconstruir* el objeto. El bello teorema de estratificación se nos ha convertido además en *útil*. Esta labor de identificar puntos en una y otra fotografía se realizaba por complicados medios mecánicos,



9. Resulta muy difícil encontrar en los libros de Geometría Proyectiva mención a la Geometría Epipolar. Ni siquiera en libros clásicos de historia de la geometría, como el de J. L. Coolidge: *A History of Geometric Methods*, reeditado por Dover, 2003.

Hay que recurrir a los libros de Ingeniería, como los siguientes, usados en Ingenierías de Telecomunicaciones o Informática:

R. I. Hartley, A. Zisserman: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge Univ. Press, 2004.

Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecká, S. Shankar Sastry: *An Invitation to 3-D Vision*. Springer, 2004.

I. Herman: *The Use of Projective Geometry in Computer Graphics*. Springer, 1992.

Por otra parte, es de señalar que la enseñanza de la fotogrametría impartida en numerosas escuelas técnicas (por ejemplo de Agrónomos) sigue los mismos principios de la Geometría Epipolar, y obviamente se desarrolló previamente a la reconstrucción de imágenes por ordenador.

Matemáticas, ¿puras o aplicadas? El caso de la geometría proyectiva

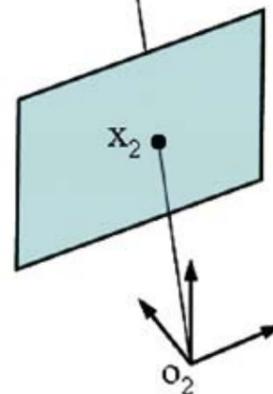
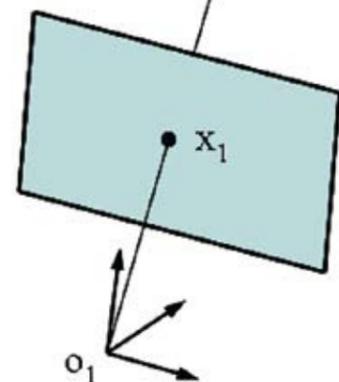
como el estereocomparador de Pulfrich (1901). Hoy día se realiza por medios computacionales. La parte de la Geometría Proyectiva que estudia esta cuestión es la llamada Geometría Epipolar⁹.

En esta historia no debemos olvidar al coronel de ingenieros francés Aime Laussedat (1819-1907), quien, en 1858, empieza a dibujar mapas cartográficos a partir de vistas, manuales primero, fotográficas después, dando origen a la fotogrametría. En 1863 la Real Academia de Ciencias de Madrid convocaba un concurso para: *Determinar los errores probables que deben resultar en los planos topográficos deduci-*

dos de dos perspectivas fotográficas, teniendo en cuenta todas las causas que pueden influir en su producción. Ganó Laussedat con la memoria *Sobre la aplicación de la fotografía al levantamiento de planos.*

CONCLUSIONES

La Geometría Proyectiva nació para responder unas preguntas planteadas desde el Arte, se desarrolló dentro de la Geometría Descriptiva, trascendió ese ámbito cuando, siendo su geometría Elíptica, incorporó en su seno a las Geo-



“ Seguro que si
hubiéramos tenido
siempre presentes estas
reflexiones, la disciplina
hubiera gozado de otra
consideración.”

metrías Euclídea e Hiperbólica, haciéndonos entender la naturaleza proyectiva de la razón doble y de muchas propiedades de configuraciones y de las cónicas, estableció puentes con otros ámbitos de la Matemática (Variable Compleja, Topología, Geometrías Algebraica y Diferencial, etc.) y tuvo de modo natural una hija, la Geometría Epipolar, que da fundamento matemático a la Fotogrametría y a la Reconstrucción de Imágenes por Ordenador. (Otro ejemplo de utilización de la Geometría Proyectiva es el de la Criptografía, que emplea los planos proyectivos sobre cuerpos finitos).

Aquí deberíamos entonar un *mea culpa* como profesores, porque *lo apretado de nuestros programas* nos hace prescindir muchas veces del principio de la historia (¿por qué nació la Geometría Proyectiva?) y de sus aplicaciones fuera de las Matemáticas. Todo esto, suponiendo que la Geometría Proyectiva siga en el plan de estudios de Matemáticas, lo cual me temo que en bastantes casos será mucho suponer. Seguro que si hubiéramos tenido siempre presentes estas reflexiones la disciplina hubiera gozado de otra consideración por parte de nuestros colegas y nuestros alumnos.

Volviendo al comienzo, ¿pertenece al ámbito de las Matemáticas Puras o al de las Aplicadas? Yo diría que pertenece a la Matemática, en singular y sin adjetivo. La Matemática está en diálogo permanente con la realidad que le rodea, diálogo que a veces parece monólogo de una u otra parte, porque durante años o siglos incluso avanzan por caminos separados¹⁰. El avance de la Matemática resulta unas veces de la resolución de problemas externos a la disciplina, de la construcción de modelos. Otras veces, el desarrollo de la propia Matemática proporciona las condiciones para que se puedan estudiar problemas de otras disciplinas¹¹. Sobre el porqué de la concordancia de ese diálogo no me pronunciaré, habida cuenta del éxito de las profecías que citaba al principio de este escrito, pero el lector audaz podrá solazarse con las reflexiones de Penrose sobre el tema¹².

10. Por ejemplo, el problema del quinto postulado de Euclides duró muchos siglos, circunscrito al ámbito matemático "puro". Hasta el siglo XIX no se plantea la cuestión de que el Universo físico pueda no tener geometría euclídea. Lo mismo podríamos decir con la teoría de números. Hoy día todos usamos la factorización de números primos para codificar nuestras claves bancarias, de correo, etc.

11. Por citar un ejemplo, cuando se desarrolló la teoría de la Relatividad, el aparato matemático del cálculo tensorial acababa de desarrollarse. Cuando llegó la Relatividad General, para la que el espacio-tiempo es una variedad diferenciable, esta noción se manejaba, aunque no había sido todavía definida con rigor (esto es, definida, porque en Matemática sólo se define con rigor; en caso contrario no es definición).

12. **R. Penrose:** *El camino a la realidad*, edición española de Debate, 2006.

13. **B. O'Neill:** *Semi-Riemannian Geometry with Applications to Relativity*, Academia Press, 1983.

Matemáticas, ¿puras o aplicadas? El caso de la geometría proyectiva

Yo diría que un trabajo que contiene definiciones y teoremas nuevos es un trabajo de Matemática. Entre los teoremas cabe considerar los procedimientos o algoritmos apropiados para abordar cálculos complejos. Por poner un ejemplo trivial, las cónicas proyectivas reales se clasifican según su rango y signatura. Esto es un teorema. También son teoremas los que dan los procedimientos de cálculo de rango y signatura de una matriz. Esta es una situación muy frecuente en las aplicaciones de la Matemática, en las que a menudo se emplean procedimientos de cálculo exacto o aproximado, cuya corrección tiene que estar (matemáticamente) demostrada. Un trabajo que utilice resultados de Matemática para abordar problemas de una disciplina concreta será un trabajo de dicha disciplina. De hecho, un mismo trabajo puede tener las dos características simultáneamente. Por ejemplo, en los años sesenta Hawking y Penrose obtuvieron una serie de teoremas sobre la existencia de singularidad inicial (véase, por ejemplo, el libro de O'Neill¹³). La motivación está en la Cosmología, las aplicaciones también (en relación al Big Bang), pero los teoremas que obtuvieron son parte de la Matemática. La singularidad es un objeto matemático bien definido, las hipótesis del teorema están bien establecidas (*en una variedad de Lorentz con tensor de Ricci no negativo, etc.*), las demostraciones también. La Matemática tiene su propio método, basado en la precisión de los axiomas y definiciones, el rigor de los teoremas y sus demostraciones. Cualquier resultado que suponga un avance y esté formulado de este modo será de Matemática. Cualquier resultado que utilice resultados conocidos de Matemática, fáciles o difíciles, para avanzar en otra disciplina, será un resultado de dicha disciplina. Por eso podemos decir que Newton, Gauss o Hawking son matemáticos y físicos: porque han "hecho" Matemática y han "hecho" Física.

El sustantivo matemático tiene tres acepciones, pues se aplica a la persona que hace Matemá-

tica, a la que utiliza la Matemática y a la que enseña la Matemática. Frecuentemente una misma persona es merecedora de dos de los tres nombres, y existen quienes se merecen los tres. Cada vez parece más necesario que personas que conocen alguna parte de la Matemática trabajen con personas de otros ámbitos para producir avance en ellos. Es lo que se denomina *interdisciplinaridad*. El matemático, trabajando de esta forma, seguramente no hará avanzar la Matemática (no obtendrá resultados nuevos para la Matemática), pero su participación será de *cooperación necesaria* para que se puedan obtener los resultados de la otra disciplina. Se-

guro que ninguno de los gigantes que cultivaron nuestra ciencia en tiempos pasados se habría sentido

“
En este sentido, los matemáticos tenemos una formación privilegiada, pues las matemáticas son el alfabeto con el cual Dios ha escrito el Universo, según decía Galileo.”

minusvalorado por ello. En este sentido, los matemáticos tenemos una formación privilegiada, pues *las matemáticas son el alfabeto con el cual Dios ha escrito el Universo*, según decía Galileo.

Termino. No espero que las reflexiones anteriores sean recibidas con aprobación unánime de los lectores. Lo que sí deseo es que hayan suscitado en ellos la curiosidad y el anhelo de elaborar sus propias opiniones sobre el tema.

Fernando Etayo.

Dpto. de Matemáticas,
Estadística
y Computación.
Facultad de Ciencias.
Universidad de Cantabria.

**Torre Espacio,
Madrid.**

*Foto por javiermoon
(www.flickr.com)