

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2014 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ARQUEOLOGÍA
El nacimiento
de la escritura
en Egipto

FÍSICA
Nuevo láser
de rayos X

PSICOLOGÍA
La importancia
del inconsciente

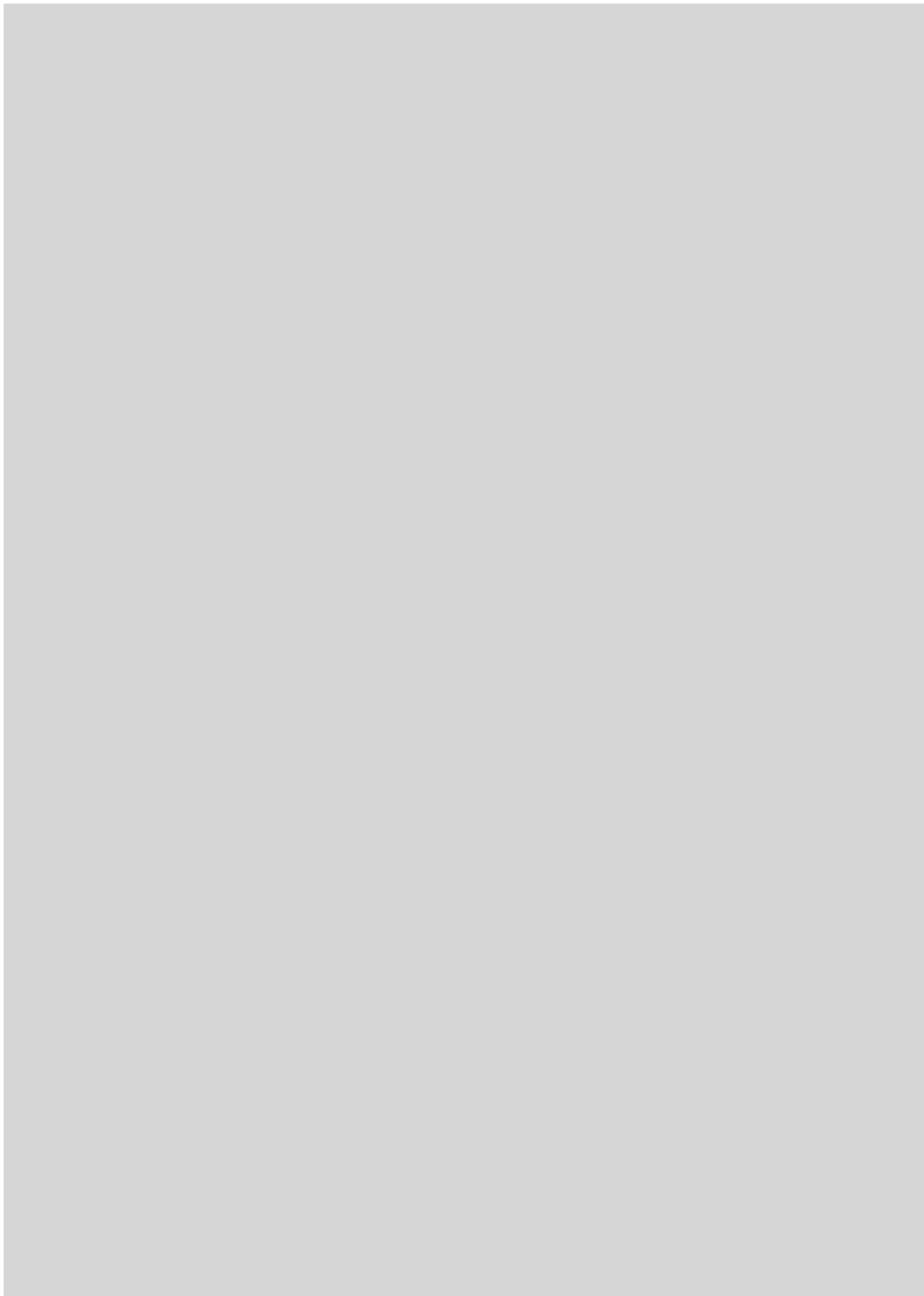


Vida artificial

La primera simulación informática
de un organismo unicelular



6,50 EUROS



VIDA ARTIFICIAL

14 Simulación de una célula viva

El primer modelo informático de un organismo unicelular. *Por Markus W. Covert*

21 Predecir el comportamiento de una célula

Por Maria Lluch Senar

23 Crear vida de la nada

La visión modular de la biología sintética olvida que la vida es producto de la evolución.

Por Robert L. Dorit

PSICOLOGÍA

28 La mente inconsciente

Impulsos y deseos inconscientes impelen nuestro pensamiento en formas que Freud no imaginaba.

Por John A. Bargh

ENFERMEDADES EMERGENTES

36 Infecciones que invaden el mar

Los patógenos de los animales terrestres están llegando al océano, donde amenazan a nutrias, focas, ballenas, corales y otras especies marinas.

Por Christopher Solomon

ARQUEOLOGÍA

42 El nacimiento de la escritura en Egipto

Los grabados rupestres, las vasijas pintadas o los sellos del Egipto del cuarto milenio documentan la existencia de varios sistemas gráficos precursores de los jeroglíficos. *Por Gwenola Graff*

TECNOLOGÍA

56 Una red global de computación para el LHC

El descubrimiento del bosón de Higgs fue posible gracias a una innovadora infraestructura de computación distribuida. Su extensión a otras disciplinas promete revolucionar la manera de hacer ciencia. *Por José M. Hernández Calama y Gonzalo Merino*

ENERGÍA

66 El lento ascenso de las renovables

No hay ninguna razón para esperar una transición rápida hacia un modelo energético basado en alternativas a los combustibles fósiles. *Por Vaclav Smil*

HISTORIA DE LA QUÍMICA

72 Wurtz y la hipótesis atómica

¿Está la materia constituida por átomos?

A lo largo del siglo XIX, esta cuestión dividió a los químicos. En la vida de Charles-Adolphe Wurtz, ocupó un lugar central. *Por Natalie Pigeard-Micault*

MECÁNICA DE FLUIDOS

76 Muros de agua

Lo mismo que otros fenómenos caóticos, las corrientes oceánicas suelen considerarse inherentemente impredecibles. Nuevas herramientas matemáticas permiten abordar su intrincado comportamiento. *Por Dana Mackenzie*

ÓPTICA

80 El láser de rayos X definitivo

Un potente microscopio que permite estudiar proteínas, reacciones químicas y estados exóticos de la materia.

Por Nora Berrah y Philip H. Bucksbaum

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes

La brigada de reparación del cerebro. Planetas enanos solitarios. Cristales líquidos. Cultivar pelo en una placa de Petri. Zona vedada al vuelo. La humanidad de los neandertales.

7 Agenda

8 Panorama

Hacia el primer exoplaneta con vida. *Por Jonay I. González Hernández, Rafael Rebolo López y Enric Pallé*
Ventanas inteligentes que modulan la luz solar.

Por Brian A. Korgel

Nuevo mecanismo de creación de especies. *Por Gregory D. D. Hurst y Chris D. Jiggins*

50 De cerca

Nanomedicamentos contra el cáncer. *Por Marta Alonso, M.ª Victoria Lozano, Rafael López y M.ª José Alonso*

52 Filosofía de la ciencia

El universo creativo de Popper. *Por Josep Corcó*

54 Foro científico

Gestión desinformada. *Por Blanca Jiménez Cisneros*

55 Ciencia y gastronomía

Cocina para celíacos. *Por Pere Castells*

88 Curiosidades de la física

Crujir de dedos. *Por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik*

90 Juegos matemáticos

El paraíso logarítmico perdido. *Por Bartolo Luque*

92 Libros

Gardner. *Por Luis Alonso*

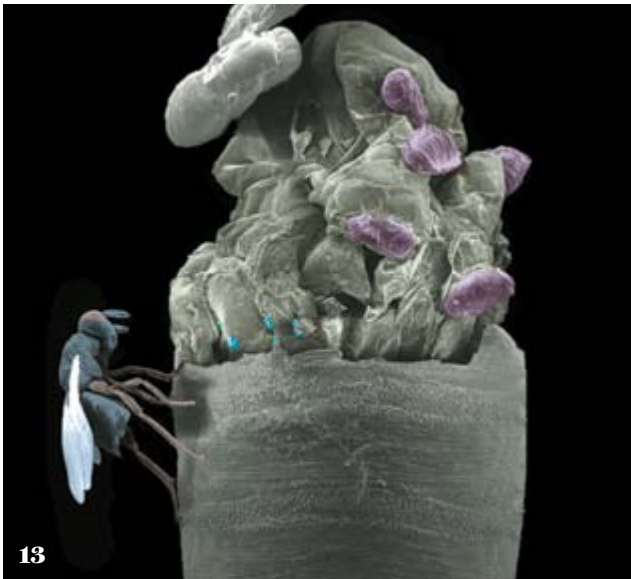
Homo impredecibilis. *Por Luis Alonso*

96 Hace...

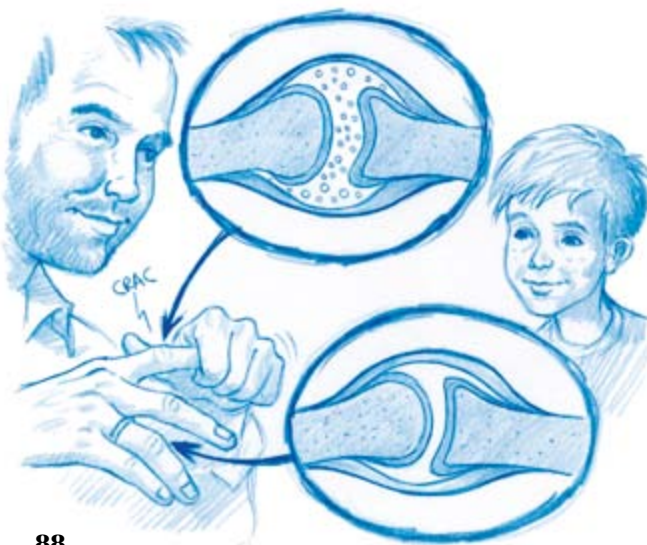
50, 100 y 150 años.



7



13



88

EN PORTADA

La simulación reciente de la vida de una bacteria en un ordenador ha constituido un avance revolucionario. Al incorporar la función de cada gen y molécula del microorganismo, el programa informático ha logrado recrear su ciclo biológico completo, que finaliza con la división celular. Tales modelos podrían cambiar la forma en que estudiamos, entendemos y diseñamos los sistemas biológicos. Ilustración de André Kutscherauer.





Diciembre 2013

GENOMA Y FUNCIÓN

Al igual que varios de los responsables del proyecto ENCODE, el artículo «La función reguladora del genoma» [por Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2013] da por superado el concepto de «ADN basura», una interpretación más cercana a la ingeniería que a la biología. Los autores asumen que en el genoma todo está para algo, y cualquier actividad bioquímica basta como prueba de alguna función.

Más, como se expone con amplitud en la sonada crítica que Dan Graur y otros autores publicaron en febrero de 2013 en *Genome Biology and Evolution* («On the immortality of television sets: “Function” in the human genome according to the evolution-free gospel of ENCODE»), la genómica comparada demuestra que, en el curso de la evolución, no más de un 15 por ciento del genoma se ha conservado en algún grado, conque al resto no cabe atribuirle otra función que la de relleno estructural.

Asimismo, hay que tener en cuenta que el tamaño del genoma varía enormemente entre organismos de fenotipo semejante («paradoja del valor C»), va-

riación de la que dan cuenta ciertas regiones que proliferan merced a errores ocasionales en la replicación o al modo parasitario en que su secuencia recluta la maquinaria celular. Solo una pequeña parte de tales parásitos y copias erróneas han sido funcionalmente reaprovechados.

LUIS CARLÓN RUIZ
Oviedo

RESPONDE DAGA: En nuestro artículo se describieron los hallazgos más importantes del proyecto ENCODE, cuyo objetivo ha consistido en caracterizar nuevos elementos reguladores del genoma humano. El descubrimiento de que gran parte de nuestro genoma contiene elementos funcionales ha permitido especular con la idea de que lo que se consideraba hasta entonces «ADN basura» podría ejercer una función reguladora. Si bien la inmensa mayoría de los resultados arrojados por el proyecto han sido acogidos con gran aceptación por la comunidad científica, la idea de dejar atrás el concepto de ADN basura está generando un intenso debate.

A pesar de que en el proyecto ENCODE se ha descubierto un enorme número de elementos funcionales dispersos en vastas regiones del ADN, se observa una gran variabilidad interespecífica en tales regiones. De este modo, existen especies que, pese a presentar un estrecho parentesco filogenético, poseen genomas de tamaños notablemente distintos. Por tanto, puede argumentarse que todo el ADN «de más» que alberga la especie con el genoma menos compacto podría no tener ninguna función. Estos argumentos son lícitos y retan la visión aportada por los autores del proyecto ENCODE, de ahí el debate.

No hay duda de que nuestro genoma alberga un sinnúmero de elementos que, en conjunto, podrían seguir considerándose ADN no útil. Entre otros, cabe mencionar las secuencias repetidas; los elementos transponibles que, al saltar de un sitio

a otro del genoma, dejan en muchos casos una copia en el lugar donde se hallaban y se insertan al azar en otra región del ADN; o los genes fósiles, aquellos que ya no funcionan o que quizás nunca llegaron a hacerlo.

Puesto que el motor de la evolución es el cambio al azar y la selección natural de los rasgos que confieren una ventaja, aun está por determinar si, desde un punto de vista evolutivo, parte del ADN aparentemente no útil confiere plasticidad al genoma y constituye una base para generar nuevos patrones de expresión génica y, por tanto, nuevas funciones.

Por otro lado, parte del ADN al que supuestamente no se le puede asignar una función podría desempeñar un papel estructural importante. Por último, es posible que la variabilidad encontrada en las regiones reguladoras entre distintas especies refleje aspectos de regulación específicos de cada especie. Por consiguiente, el hecho de que no se hallen conservadas no sería un criterio acertado para considerarlas no funcionales. Aclarar qué parte del genoma es realmente funcional llevará tiempo y exigirá el esfuerzo integrado de investigadores de distintas disciplinas.

El tiempo nos ayudará a valorar la trascendencia del proyecto ENCODE. Proyectos similares se han realizado en otros organismos modelo, como el ratón, la mosca de la fruta o el nemátodo *Caenorhabditis elegans*. El análisis comparativo de estos y otros genomas, así como la manipulación empírica de posibles elementos reguladores, arrojarán más luz sobre la evolución de los genomas y permitirá definir con más precisión qué proporción de ellos contiene información útil. Mientras tanto, el debate sobre la existencia de ADN basura en los genomas, entre ellos el nuestro, sigue abierto.

Erratum corrige

Como señala nuestro lector Santiago Martí Santos, en el artículo «Moléculas especulares», de Sarah Everts [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2014], se confunde la quiralidad de los aminoácidos (formas D o L) con su actividad óptica (dextrógiro o levógiro). Para corregir el texto, debe sustituirse «aminoácido levógiro» por «L-aminoácido» o «aminoácido zurdo», y «aminoácido dextrógiro» por «D-aminoácido» o «aminoácido diestro». Este error ha sido enmendado en la versión digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.º, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



NEUROCIENCIA

La brigada de reparación del cerebro

Un estilo de vida activo redunda en la salud del cerebro. Eso creen desde hace tiempo los científicos y así lo corroboran los estudios: el ejercicio físico y la actividad intelectual y social —o «enriquecimiento ambiental», como se diría en el lenguaje de la especialidad— potencian el aprendizaje y la memoria y protegen contra el envejecimiento y las neuropatías. Estudios recientes señalan uno de los efectos beneficiosos a escala celular: el enriquecimiento ambiental restaura la mielina del cerebro (el aislamiento protector que recubre los axones, o fibras nerviosas) que se pierde a causa de la edad, las lesiones o ciertas enfermedades, como la esclerosis múltiple. Pero ¿de qué modo propicia el ambiente la reparación de la mielina?

La respuesta radica, al parecer, en unos corpúsculos membranosos naturales llamados exosomas. Diversos tipos de células liberan en los líquidos corporales estas diminutas vesículas de proteínas y material genético. Cargadas con moléculas de señalización, se dispersan por el organismo «como si fueran mensajes dentro de una botella», explica R. Douglas Fields, neurobiólogo de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. A continuación, se dirigen a ciertas células y modifican su comportamiento. En estudios con animales se observó que los exosomas segregados por las células inmunitarias durante el enriquecimiento ambiental estimularon la reparación de la mielina por parte de las células del cerebro.

Los especialistas creen que hay posibilidades de convertirlos en biomarcadores para el diagnóstico de enfermedades o en vehículos para administrar fármacos contra el cáncer u otros compuestos terapéuticos.

Los exosomas producidos en el transcurso del enriquecimiento ambiental transportan microARN (pequeños fragmentos de material genético) que supuestamente ordenan a células inmaduras del cerebro que se transformen en oligodendrocitos, los responsables de la síntesis de mielina. Si se extraen exosomas de la sangre de ratas jóvenes y se inyectan a ratas más viejas se observa un incremento de hasta el 62 por ciento en los niveles de mielina, según describe un equipo de la Universidad de Chicago en el número de febrero de *Glia*.

Se ha descubierto también el modo de crear exosomas fuera del cuerpo y fabricarlos por encargo para posibles tratamientos. A través de la estimulación de células inmunitarias de la médula ósea fue posible imitar las condiciones del enriquecimiento ambiental en una placa de cultivo, asegura Richard Kraig, profesor de neurología en Chicago.

El equipo de Kraig estudia ahora cómo convertir los exosomas en un tratamiento contra la esclerosis múltiple. En un artículo publicado en *Journal of Neuroimmunology* han descrito que los creados en el laboratorio habían estimulado la producción de mielina en una muestra de tejido cerebral de ratas que simulaba las lesiones de la esclerosis múltiple, con un incremento de los niveles de mielina de hasta el 77 por ciento de los valores normales.

El siguiente paso consistirá en ver si los exosomas obtenidos de células inmunitarias son tan eficaces en animales afectados por la enfermedad, aclara Aya Pusic, miembro del equipo. Ella opina que, con algo de suerte, las pruebas en humanos podrán dar comienzo en cinco años.

—Debra Weiner

Planetas enanos solitarios

Plutón fue durante décadas el verdadero peso pesado de los confines del sistema solar. Hoy, sin embargo, sabemos que ese querido mundo no es más que uno de los múltiples planetas enanos conocidos, la mayoría de los cuales orbitan más allá de Neptuno.

El cúmulo de descubrimientos que contribuyeron a que Plutón perdiese la categoría de planeta y se convirtiese en un planeta enano tuvo lugar hace ahora unos diez años. Entre 2002 y 2007, Mike Brown, astrónomo del Instituto de Tecnología de California, y su equipo descubrieron varios objetos de buen tamaño en los arrabales del sistema solar; entre ellos, los planetas enanos Eris, Makemake y Haumea (si bien otro grupo reclama para sí el hallazgo de Haumea). Pero, desde entonces, y a pesar de que el equipo de Brown dejó sin explorar vastas franjas de cielo, el descubrimiento de planetas enanos se ha estancado.

¿La razón? Según un estudio reciente, la mayoría de los objetos brillantes y voluminosos habrían sido localizados ya. Megan Schwamb, antigua estudiante de doctorado de Brown que ahora investiga en la Academia Sínica de Taiwán, llevó a cabo una exploración a gran

escala del sistema solar exterior y extrapoló los resultados a fin de estimar el número total de astros de ese tipo. «Vendrían a ser unos doce», explica Schwamb. «Lo cual implica que el inventario de planetas enanos brillantes estaría casi completo.» Schwamb y sus colaboradores publicaron sus resultados el pasado mes de enero en *The Astronomical Journal*.

A pesar de que los astrónomos no han rastreado todo el cielo, sí parecen haber cubierto las zonas en las que tienden a acumularse los planetas enanos. Puede que alguno haya pasado inadvertido, apunta Darin Ragozzine, del Instituto de Tecnología de Florida. El estrellado disco de la Vía Láctea podría haber eclipsado un planeta enano, explica el investigador, pero parece improbable que sean muchos los que queden por descubrir.

«Hemos vivido una edad de oro en el hallazgo de planetas enanos, pero ya ha pasado», observa Schwamb. Con todo, aún podría haber objetos similares y más alejados, pero apenas visibles con los métodos de detección actuales.

«Están ocultos en las sombras, a la espera de que alguien los encuentre», concluye la investigadora. —John Matson

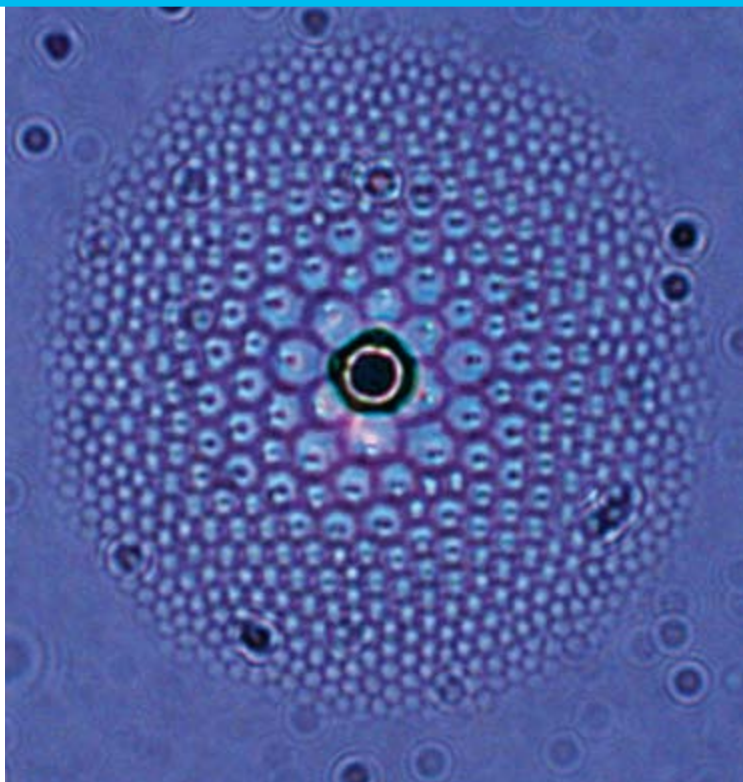


¿QUÉ ES ESTO?

Los cristales líquidos, tal y como da a entender su nombre, ocupan un estado intermedio entre el líquido y el sólido. Hace tiempo que los investigadores saben manipular sus alargadas moléculas para controlar la luz en las pantallas digitales. Ahora, un equipo de la Universidad de Pensilvania ha desarrollado un nuevo método para aprovechar sus singulares propiedades. Al depositar un gránulo de sílice sobre una capa de cristal líquido, las fuerzas capilares reordenaron los cristales hasta formar una estructura compuesta por cientos de pétalos diminutos dispuestos alrededor del gránulo. La imagen que reproducimos aquí muestra esa estructura floral. Los resultados se publicaron el pasado mes de diciembre en *Physical Review X*.

En conjunto, los pétalos autoensamblados actúan como una lente compuesta que enfoca la luz de manera muy parecida a como lo hace el ojo de una mosca. Estas lentes podrían mejorar la captación de luz de los paneles solares, así como emplearse a modo de puntas en sondas de fibra óptica que permitiesen a los cirujanos explorar el interior del cuerpo humano.

—Annie Sneed



BIOQUÍMICA

Cultivar pelo en una placa de Petri

El biólogo celular Desmond Tobin se pasa el día recogiendo órganos de pacientes sometidos a intervenciones de cirugía estética. No se trata ni de riñones ni de otros órganos vitales: se dedica a recolectar retazos de piel extirpados de detrás de la oreja en las operaciones de *lifting* facial. Para él las muestras de piel son preciosas porque albergan unos órganos diminutos, los folículos de los que nace el pelo.

En el Centro de Ciencias de la Piel de la Universidad de Bradford, Tobin extrae con cuidado los folículos y reproduce con ellos el crecimiento del pelo humano en una placa de Petri.

Otros investigadores, como James V. Gruber, director general de investigación y desarrollo de Lanza Consumer Care, ponen a prueba en los folículos extraídos la eficacia de



nuevos productos capilares y dermatológicos sin recurrir a animales de laboratorio. Gruber explicó su trabajo el pasado diciembre en el encuentro anual de la Sociedad de Químicos Cosméticos de EE.UU. y Canadá.

Dos moléculas generan expectativas como tratamientos contra la alopecia, según Gruber. Un péptido de levadura que aparentemente revierte la senescencia de las células foliculares, la entrada en latencia que paraliza su multiplicación. Y una isoflavona antioxidante que aumenta las concentraciones de colágeno y elastina, componentes que refuerzan la matriz cutánea que sostiene los folículos en su lugar.

Tobin y Gruber han trabajado hasta hoy con cabello que ha sido forzado a entrar en senescencia por medios químicos. El paso siguiente consistirá en averiguar si es posible despertar los folículos que de forma natural se han vuelto inactivos. —Rebecca Guenard

ECOLOGÍA

Zona vedada al vuelo

En los terrenos del aeropuerto internacional John F. Kennedy (JFK), los técnicos de control de fauna mataron 10.123 aves durante 2012. Situado al noreste de la reserva natural Bahía de Jamaica, en el distrito neoyorquino de Queens, el censo de caza del JFK incluye miles de gaviotas, cientos de estorninos y tórtolas, y una minoría de especies más majestuosas, como el águila pescadora y el cernícalo americano. El programa de control de fauna del aeropuerto, que se aplica desde hace tiempo, es uno más de los muchos que velan por evitar las peligrosas y costosas colisiones de aves con las aeronaves en todo el mundo.

En esta situación, las modernas técnicas forenses tal vez tengan algo que decir para poner freno a esa mortandad. Un equipo de investigación australiano afirma que el ADN hallado en los restos de los pájaros siniestrados puede arrojar luz sobre nuevas estrategias para el control de la avifauna en los aeropuertos.

El estudio forense comenzó tras una llamada del personal del aeropuerto de Perth a Michael Bunce, entonces en la Universidad Murdoch. «Tenemos un congelador lleno de pájaros: ¿los que-

rrían?», le preguntaron. Pronto él y sus colaboradores contaron con 77 cadáveres de aves y se pusieron manos a la obra.

Comenzaron por extraer el contenido digestivo de las aves y secuenciar el ADN de este. En un estudio publicado el año pasado en *Investigative Genetics* señalaban que las secuencias génicas halladas pertenecían a especies comunes de ratones, cangrejos de río y saltamontes, así como a plantas gramíneas.

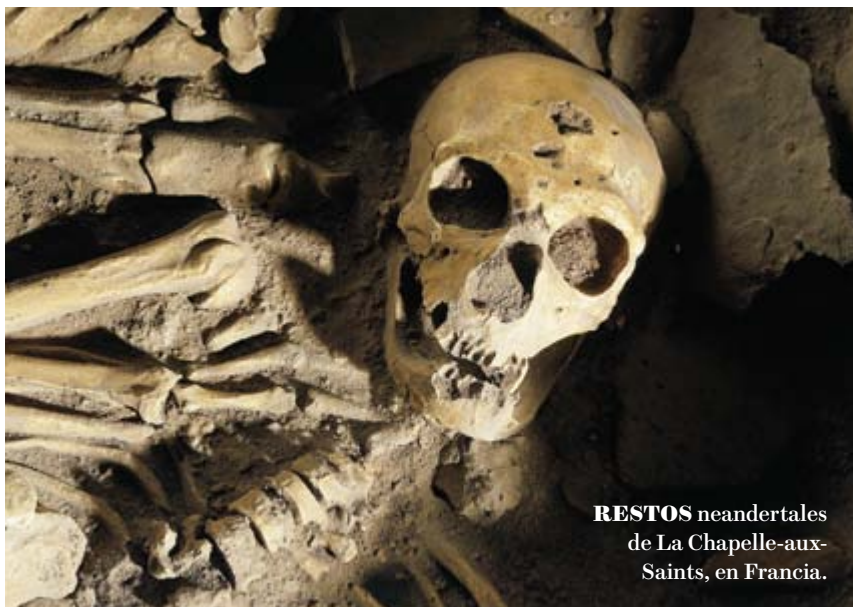
Los análisis genéticos de este tipo podrían informar sobre el tipo de gestión ambiental más adecuada para disuadir a las aves. «¿Qué hacer si los pájaros hallan alimento en la proximidad?», se pregunta Bunce. ¿Hay que controlar las poblaciones de peces de las aguas cercanas, envenenar los roedores o fumigar la zona con insecticidas? En Perth, los resultados de sus investigaciones hicieron que el aeropuerto instalara redes en los cursos de agua para controlar la gambusia, un pez invasor introducido como medio de control de los mosquitos. A su juicio, el estudio ya habrá valido la pena si consigue evitar siquiera una o dos colisiones.

—Peter Andrey Smith

THOMAS RUCHS (ilustración); TONY CORDOZA, GETTY IMAGES (gaviotas)



La humanidad de los neandertales



RESTOS neandertales de La Chapelle-aux-Saints, en Francia.

Hace unos 60.000 años, en una pequeña gruta caliza situada en lo que hoy es Francia, un grupo de neandertales cavó una fosa y enterró en ella a un individuo de edad avanzada. Esa es la conclusión que arroja un nuevo estudio sobre el yacimiento en el que en 1908 fue hallado el célebre esqueleto neandertal de La Chapelle-aux-Saints. La investigación entraña importantes consecuencias sobre la manera de concebir el comportamiento y las capacidades cognitivas de nuestros parientes evolutivos más cercanos.

Hace ya tiempo que algunos arqueólogos sostienen que diversos yacimientos neandertales presentan indicios de enterramientos, una práctica considerada clave en la conducta del ser humano moderno. Otros, sin embargo, han objetado que los yacimientos en cuestión fueron excavados hace largo tiempo y con técnicas hoy consideradas poco ortodoxas, las cuales habrían contribuido a enturbiar los hechos.

Durante los últimos años han aparecido pruebas convincentes de que los neandertales practicaban algunas actividades modernas, como decorarse el cuerpo o fabricar herramientas elaboradas. Tales hábitos surgieron antes de que *Homo sapiens* invadiese sus predios, de lo que cabe deducir que los neandertales desarrollaron esas tradiciones culturales por su propia cuenta, sin copiarlas de otros grupos.

Ahora, una nueva excavación en la cueva francesa ha sacado a luz más huesos y dientes de origen neandertal, así como utensilios de piedra y restos de animales. William Rendu, de la Universidad de Nueva York, y su equipo han hallado pruebas de que la fosa en la que yacía el esqueleto fue, al menos en parte, modificada para el enterramiento, por lo que no se correspondería con una oquedad completamente natural. Además, observaron que los huesos de animales habían sido roídos por carnívoros, pero no así los de neandertal. Ello indicaría que el cadáver fue cubierto con rapidez, como cabría esperar de un enterramiento deliberado. Los hallazgos de Rensu y sus colaboradores aparecieron publicados el pasado mes de diciembre en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

No deja de resultar irónico que fuese el descubrimiento de La Chapelle-aux-Saints el que, a principios del siglo xx, endosara a los neandertales su reputación de brutos. Poco después del hallazgo, el paleontólogo Marcellin Boule reconstruyó el esqueleto y presentó a sus coetáneos un individuo encorvado, de andares desgarbados, rodillas dobladas, cuelllicorto, con un cráneo bajo y frente huidiza. Nació así la imagen del cavernícola de pocas luces. Más tarde se descubrió que, en realidad, se trataba de un varón envejecido aquejado de una grave artritis.

—Kate Wong

AGENDA

CONFERENCIAS

3 de marzo

**El agua regenerada:
Una fuente segura**

Eloy García Calvo, IMDEA Agua
Marta Vivar García, IMDEA Agua
Ciclo «El agua, ¿fuente de vida?»
Residencia de Estudiantes
Madrid
www.residencia.csic.es

6 de marzo

El quark cumple 50 años

Manuel Aguilar Benítez de Lugo, CIEMAT
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza
Zaragoza
ciencias.unizar.es/web/citaCiencia.do

7 de marzo

**Del grafito al grafeno: ¿Nos hallamos
en las puertas de una nueva era
tecnológica basada en el carbono?**

Pere Alemany Cahner,
Universidad de Barcelona
Casal Marià
Olot
www.olotcultura.cat > Agenda

18 y 20 de marzo

**Galileo Galilei: Su vida, su obra,
su tiempo**

José Manuel Sánchez Ron, Universidad
Autónoma de Madrid
Fundación Juan March
Madrid
www.march.es

EXPOSICIONES

Hablemos de drogas

Cosmocaixa
Barcelona
www.parlemdedrogues.org

OTROS

Ciclo de conferencias

Historias del Mediterráneo

CaixaForum
Palma de Mallorca
www.csic.es > Agenda



Hacia el primer exoplaneta con vida

Dos ingeniosas técnicas en espectroscopía y espectropolarimetría prometen interesantes avances en la búsqueda de vida extraterrestre

PEINES DE FRECUENCIAS LÁSER

Durante los últimos años, la astrofísica ha visto crecer su interés por la espectroscopía de alta precisión. Esta técnica resulta imprescindible para buscar exoplanetas similares a la Tierra (sobre todo, aquellos situados en la zona de habitabilidad de su estrella anfitriona), así como para medir de manera directa la expansión acelerada del universo, o para estudiar la estabilidad temporal de las constantes físicas fundamentales a partir de la observación de galaxias muy lejanas.

Buena parte de los planetas extrasolares conocidos hasta ahora han sido descubiertos gracias a medidas muy precisas de los ligeros vaivenes que experimenta una estrella como consecuencia de la atracción gravitatoria de un planeta cercano. Este método recibe el nombre

de «técnica de la velocidad radial», ya que su objetivo consiste en medir las variaciones en la velocidad del astro a lo largo de la línea de visión desde la Tierra. Dichos cambios se observan como diminutos desplazamientos Doppler en el espectro de la estrella (las variaciones de longitud de onda que se producen cuando la fuente se acerca o aleja del observador).

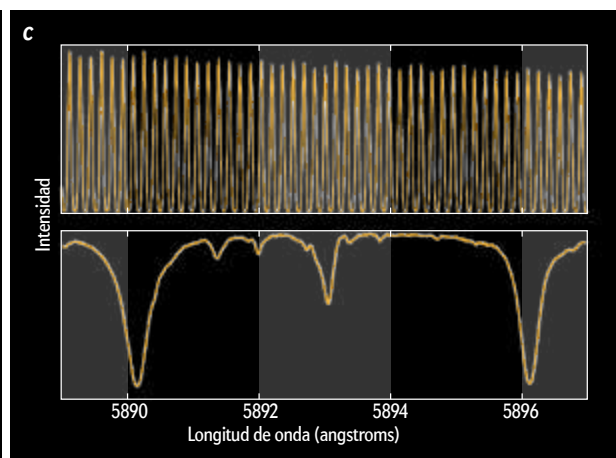
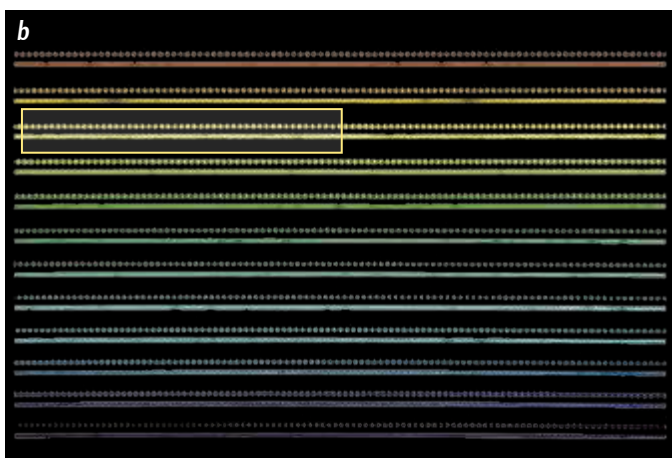
La mayor parte de los más de 500 exoplanetas descubiertos hasta la fecha mediante la técnica de la velocidad radial son de gran tamaño, similares a Júpiter o Saturno. Y aunque durante los últimos años se han detectado varios semejantes a Neptuno o incluso menores, la mayoría posee períodos orbitales cortos, inferiores a 100 días; es decir, se encuentran muy próximos a su estrella anfitriona.

La técnica de la velocidad radial requiere medir con gran precisión las líneas espectrales de la estrella, lo cual exige una calibración excepcional de las longitudes de onda. Esto último también resulta necesario en las mediciones directas de la aceleración cósmica. La evolución temporal de la constante de Hubble quizá pueda evaluarse observando durante décadas los desplazamientos Doppler de las líneas de absorción del «bosque Lyman alfa» (una serie de longitudes de onda asociadas al hidrógeno) de cuásares muy distantes. Sin embargo, el cambio que cabe esperar en el ritmo de expansión del universo lejano se estima en 1 centímetro por segundo al año. Medir una variación semejante exige espectrógrafos extremadamente precisos y estables durante décadas, instalados en los telescopios del mayor diámetro posible.



PEINES ESPECTROSCÓPICOS:

Representación artística de HD 75289 (a), una estrella similar al Sol que posee un planeta de tipo Júpiter con un período orbital de 3,5 días. La imagen espectroscópica del astro (b) fue obtenida con el instrumento HARPS; en ella se muestran los diferentes colores de la estrella (líneas) y el espectro del peine de frecuencias láser (puntos). La descomposición en longitudes de onda de la región sombreada (c) incluye el doblete de absorción del sodio (abajo), así como los pulsos del peine de frecuencias láser (arriba). La gran cantidad de pulsos proporcionados por el peine, su estabilidad y su similitud permiten medir con una precisión excepcional los vaivenes inducidos en la estrella por la presencia del planeta cercano.



Uno de los mejores espectrógrafos disponibles hoy en día es el instrumento HARPS. Instalado en el telescopio de 3,6 metros del Observatorio de La Silla, en Chile, perteneciente al Observatorio Europeo Austral (ESO), este dispositivo ha logrado descubrir numerosos planetas de tamaños diversos, desde algunos similares a Júpiter hasta supertierras y otros incluso de tipo terrestre.

Los desplazamientos Doppler inducidos en el espectro de una estrella resultan tanto más pequeños cuanto menor es la masa del planeta y cuanto más alejado se encuentra este de su estrella anfitriona. Como referencia, la Tierra induce en el Sol variaciones en la velocidad radial del orden de 9 centímetros por segundo. Si bien hasta ahora se han detectado unos diez planetas con masas similares al nuestro, todos ellos orbitan a muy poca distancia de su estrella anfitriona; la mayor parte, con períodos de menos de 10 días.

El espectrógrafo HARPS se calibra en longitudes de onda con lámparas de torio y argón, las cuales generan líneas de intensidad variable en distintas posiciones a lo largo del espectro visible. Con este sistema, la precisión del espectrógrafo se encuentra limitada a 24 centímetros por segundo en una observación individual.

Desde hace varios años, nuestro grupo del Instituto de Astrofísica de Canarias colabora con el ESO y el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, liderado por Theodor Hänsch, en el desarrollo de un nuevo sistema de calibración.

En 2005, Hänsch y John Hall, de la Universidad de Colorado y el NIST estadounidense, fueron galardonados con el premio Nobel de física por sus contribuciones a la espectroscopía de precisión mediante una nueva técnica: el peine de frecuencias ópticas [véase «Reglas de luz», por Steven Cundiff, Jun Ye y John Hall; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2008]. Tales dispositivos se caracterizan por emitir miles de frecuencias equiespaciadas sobre un ancho de banda del orden del terahercio. Tanto la frecuencia fundamental del aparato como su frecuencia de repetición (la diferencia entre dos líneas consecutivas) se encuentran sincronizadas con relojes atómicos, lo que garantiza una gran estabilidad a largo plazo. Además, la precisión de las calibraciones espectrométricas depende de la similitud entre líneas y del número de líneas disponibles, por lo que los peines de frecuencias ópticas resultan idóneos para este fin.

En un artículo publicado en mayo de 2012 en la revista *Nature*, nuestra colaboración refirió un método para acoplar con éxito la técnica de peines de frecuencias láser al espectrógrafo HARPS. Gracias a ello logramos aumentar la precisión de una imagen espectroscópica individual hasta los 6,7 centímetros por segundo, lo que mejoraba de manera considerable las prestaciones de las lámparas de calibración usuales. Además, la acumulación de varias imágenes permite reducir el ruido estadístico hasta alcanzar una precisión de 2,5 centímetros por segundo estable a corto plazo. Aunque la estabilidad a largo plazo (varios años) aún deberá ser demostrada, los resultados son alentadores.

El nuevo método de calibración se aplicó a la estrella HD 75289, un astro similar al Sol que, situado a unos 95 años luz, posee un planeta de tipo Júpiter con un período orbital de 3,5 días. Nuestros resultados demostraron que la nueva técnica ya podía emplearse de forma rutinaria en observaciones científicas.

De cara al futuro, se prevé instalar peines de frecuencias láser en otros espectrógrafos del ESO; en particular, en el instrumento ESPRESSO, que colidera nuestro grupo y que actualmente se encuentra en fase de construcción. Dicho espectrógrafo, que podrá utilizarse simultáneamente con cualquier combinación de los cuatro telescopios VLT de 8 metros del Observatorio Paranal, en Chile, se postula como el más potente para la búsqueda de exotierras en estrellas cercanas.

—Jonay I. González Hernández
y Rafael Rebolo López
Instituto de Astrofísica de Canarias

LA FIRMA BIOLÓGICA DE LA TIERRA

Las últimas dos décadas han sido testigo del descubrimiento de cientos de planetas extrasolares. Aunque en un principio la mayoría de ellos eran gigantes gaseosos, los datos de los últimos años dibujan un panorama mucho más estimulante. Hoy sabemos que los sistemas planetarios múltiples resultan muy comunes y que, desde un punto de vista estadístico, la mayoría de las estrellas posee al menos un planeta (posiblemente varios). Además, los planetas de tipo rocoso, como la Tierra o Venus, abundan más que los gigantes gaseosos.

Poco a poco nos acercamos al objetivo de detectar planetas rocosos en la zona de habitabilidad de la estrella anfitriona: la región en la que la temperatura permitiría que la superficie de un planeta albergase agua líquida. Cuando tales hallazgos sean moneda común, los esfuerzos se concentrarán en estudiar y caracterizar sus atmósferas y superficies, a fin de determinar si gozan de las condiciones adecuadas para la vida [véase «El amanecer de los exoplanetas», por Michael D. Lemonick; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2013].

Hoy por hoy, la mejor forma de caracterizar la atmósfera de un planeta consiste en observarlo durante un tránsito; es decir, cuando, visto desde la Tierra, el planeta pasa por delante de su estrella. Sin embargo, debido a que la probabilidad de alineación es pequeña, solo una minoría de los planetas transita. Así pues, para una caracterización generalizada de las atmósferas exoplanetarias, tendremos que detectar directamente la radiación reflejada por el planeta, la emitida por su superficie o ambas, separándolas de la luz de la estrella mediante técnicas bastante complejas (interferometría o coronografía) y aún fuera de nuestro alcance en cuanto a la precisión requerida.

Con este objetivo en mente, varias colaboraciones han propuesto estudiar la luz reflejada por la Tierra como si de un exoplaneta se tratara. En principio, para ello deberíamos alejarnos de nuestro planeta hasta que su apariencia se redujera a un punto de luz. Sin embargo, existe otra alternativa menos costosa: emplear telescopios terrestres para observar el lado oscuro de la Luna (no confundir con el lado oculto). La débil luz cenicienta que ilumina la superficie lunar no es más que radiación solar que se ha reflejado previamente en el lado diurno de la Tierra, por lo que su espectro contiene información sobre la química de la atmósfera terrestre. En definitiva, se trata de emplear la Luna a modo de espejo para observar nuestro planeta a distancia.

Esta técnica ha permitido caracterizar el espectro de reflexión de la Tierra como referencia para determinar sus principales marcadores biológicos: compuestos como oxígeno, dióxido de carbono, agua o metano. En ausencia de vida, tales gases se recombinarían, lo que implicaría la práctica desaparición de algunos de ellos. Decimos por ello que nuestra atmósfera se encuentra en «desequilibrio químico», una huella inconfundible de la presencia de actividad



¿HAY VIDA EN LA TIERRA? La luz cenicienta de la zona ensombrecida de la Luna, vista desde el Observatorio Paranal, en Chile. Dado que esa luz constituye un reflejo de la que procede del lado diurno de la Tierra, su análisis espectropolarimétrico ha permitido detectar algunos de los marcadores biológicos de nuestro planeta, así como deducir la existencia de nubes y de vegetación. La técnica augura interesantes aplicaciones para la búsqueda de vida en otros mundos.

biológica y, probablemente, la única visible desde distancias astronómicas.

Otro biomarcador de gran interés procede de la luz reflejada en la vegetación, una de las mejores pistas para inferir la existencia de formas de vida compleja. Las hojas de las plantas absorben la mayoría de la luz visible que incide sobre su superficie. Sin embargo, más allá de 700 nanómetros (justo en el límite de nuestra percepción visual), las plantas reflejan casi toda la luz solar, gracias a lo cual evitan sobrecalentarse. Este cambio brusco en el albedo recibe el nombre de «escalón rojo» y constituye un rasgo que puede detectarse en el espectro global de la Tierra cuando se observan extensas zonas boscosas, como el Amazonas.

En un artículo publicado en marzo de 2012 en la revista *Nature* junto con Michael

F. Sterzik, del ESO, y Stefano Bagnulo, del Observatorio de Armagh, referimos nuevas mediciones de esa luz cenicienta. En ellas empleamos observaciones espectropolarimétricas, una técnica para analizar el brillo de los distintos colores del espectro —como se venía haciendo hasta ahora— pero que, además, permite medir la polarización de la luz; es decir, el plano en el que oscila su campo electromagnético.

Por lo general, la luz emitida por el Sol u otras estrellas no se encuentra polarizada; todas las direcciones de oscilación aparecen con probabilidades parejas. Sin embargo, cuando la luz solar se refleja en un planeta, parte de ella puede polarizarse. El grado de polarización depende de las propiedades físicas de la superficie, así como de ciertos procesos de dispersión múltiple, como los que tienen lugar

en las nubes. Estos fenómenos ópticos provocan que las distintas regiones terrestres (océanos, bosques o desiertos) y los gases que componen nuestra atmósfera dejen sus huellas en el espectro de polarización.

La técnica mencionada permite caracterizar de manera más precisa la composición de la atmósfera y la superficie de un planeta, incluidos los posibles biomarcadores, delatores de vida. En nuestro caso, a partir únicamente de las observaciones espectropolarimétricas y su comparación con los modelos (en particular, sin usar ninguna información relativa a la composición de la Tierra), pudimos deducir que la atmósfera terrestre es parcialmente nubosa, que parte de la superficie del planeta se encuentra bañada por océanos y que grandes extensiones continentales se hallan cubiertas de vegetación.

La espectropolarimetría esquivará algunos de los obstáculos principales que plagan el estudio de las huellas químicas de los planetas extrasolares. En particular, ahorrará una parte del desarrollo instrumental necesario, puesto que no se requerirá separar la luz del planeta de la procedente de la estrella.

Dado que el flujo de luz emitido por una estrella resulta varios millones de veces mayor que el reflejado por el planeta, detectar la polarización inducida por este último exigirá recolectar enormes cantidades de luz. Por tanto, la técnica requerirá el uso de algunas de las grandes instalaciones telescópicas futuras, como el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT), cuya construcción en el cerro Armazones, en Chile, se prevé que concluya en la década de 2020.

—Enric Pallé
Instituto de Astrofísica de Canarias

MATERIALES

Ventanas inteligentes que modulan la luz solar

Un nuevo material compuesto que absorbe de forma selectiva y reversible la radiación visible e infrarroja podría mejorar la eficiencia energética de los edificios

En Estados Unidos, cerca del 40 por ciento de la energía consumida y alrededor del 30 por ciento de la energía relacionada con emisiones de carbono se contabiliza en edificios residenciales y comerciales. Para reducir esta demanda energética, se necesitan materiales capaces de interactuar con la radiación solar que entra por las ventanas, de modo que

puedan regularse la iluminación y la temperatura según las condiciones ambientales. En concreto, ventanas con recubrimientos electrocromáticos (que cambian de color, transparencia o ambos, cuando se hallan sometidos a un campo eléctrico) podrían reducir de forma notable el consumo de energía en edificios [véase «Materiales electrocromáticos», por Roger

J. Mortimer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2013].

El pasado mes de agosto, Anna Llordés, del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, y sus colaboradores publicaron un gran avance en el desarrollo de dichos materiales. Este equipo ha creado un material compuesto (*composite*), a base de nanocristales de óxido de indio dopa-

ES