

INVESTIGACION *y* CIENCIA

OCTUBRE 2004
5,50 EURO

Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

AMARRAS ELECTRODINAMICAS EN EL ESPACIO

**BOMBAS ANTIBUNKER
NUCLEARES**

**LA MUERTE
DE LAS ESTRELLAS
COMUNES**

**NANOSENSORES
DE CAMPOS MAGNETICOS**

**CONTROL GENETICO
DEL DESARROLLO DEL OJO**



3

HACE...

50, 100 y 150 años.

4

APUNTES

Paleoantropología...

Astronomía...

Obesidad...

Sida...

Entomología.

30

CIENCIA Y SOCIEDAD

Ecología, el coyote
y las áreas tropicales deforestadas...

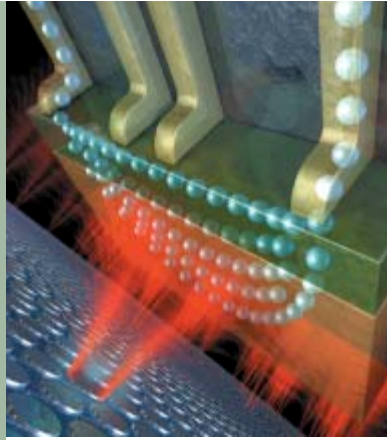
Cáncer de pulmón,
factores de riesgo.



34

DE CERCA

El hielo: reserva de vida
durante el invierno.



14

Nanosensores de campos magnéticos

Stuart A. Solin

Gracias a unos dispositivos minúsculos que se basan en un fenómeno descubierto hace poco, la magnetorresistencia extraordinaria, podrían construirse discos magnéticos rapidísimos y de enorme capacidad.

22

Amarras electrodinámicas en el espacio

Enrico Lorenzini y Juan Sanmartín

Las amarras espaciales sacan partido de leyes físicas fundamentales para producir empuje o frenado, gravedad artificial y potencia eléctrica de bajo coste.

36

Bombas antibúnker nucleares

Michael A. Levi

Se diseñan bombas nucleares que penetrarán en la tierra para destruir refugios militares. Su utilidad estratégica y táctica se halla en tela de juicio.



44



La muerte de las estrellas comunes

Bruce Balick y Adam Frank

La muerte del Sol, dentro de cinco mil millones de años, será un espectáculo maravilloso. Al igual que otras estrellas de su misma naturaleza, engendrará una nebulosa planetaria.

54

Control genético del desarrollo del ojo

Emili Saló

Hay en el reino animal una amplia diversidad de tipos de ojos, cuyo desarrollo inicial se halla controlado por un circuito genético que ha persistido en el curso de la evolución.





6

Mejora genética de cereales

Stephen A. Goff y John M. Salmeron

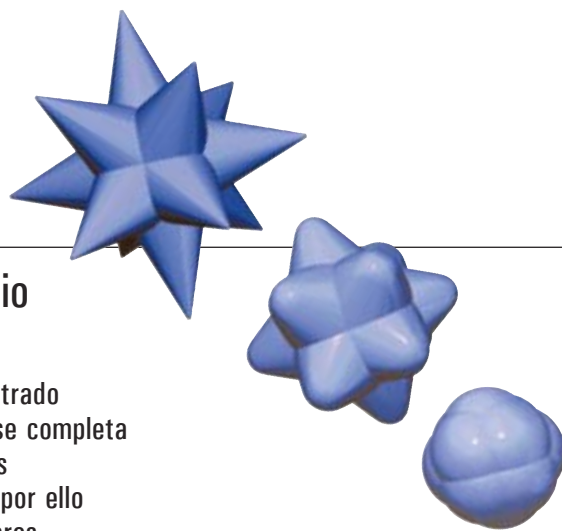
La comparación de los genomas de los principales cultivos de cereales, junto con la mejora asistida por marcadores moleculares, abren el camino hacia una nueva revolución verde.

68

Las formas del espacio

Graham P. Collins

Un matemático ruso ha demostrado la conjetura de Poincaré. Así se completa la catalogación de los espacios tridimensionales. Quizá reciba por ello un premio de un millón de dólares.



80

Origen de los celos

Christine R. Harris

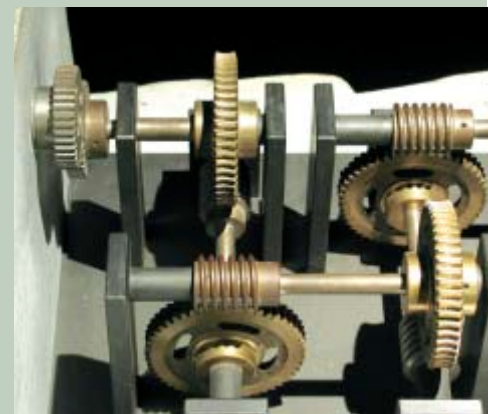
A la luz de la investigación reciente, las diferencias sexuales que la psicología evolutiva atribuye a este sentimiento ancestral se desvanecen: hombres y mujeres parecen sufrir los celos por igual.



90

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

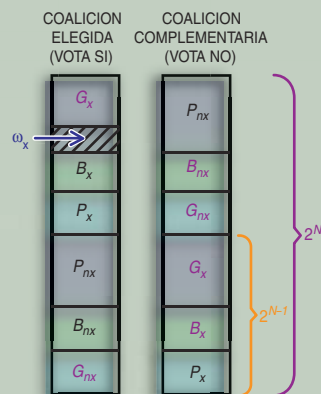
Sólo doce pasos hasta la eternidad, por Wolfgang Bürger



92

JUEGOS MATEMÁTICOS

Más sobre el reparto de poder, por Juan M.R. Parrondo



94

LIBROS

Útiles matemáticos
Tablas



INVESTIGACION CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.^a Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas

PRODUCCIÓN M.^a Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, Steve Mirsky,
George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL
Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER
Gretchen G. Teichgraber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.

Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.

Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.^a planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.^a Claret, 281 4.^o 3.^a
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Felipe Cortés: *Mejora genética de cereales*; Alvar Sánchez Moreno: *Nanosensores de campos magnéticos*; Juan Sanmartín: *Amarras electrodinámicas en el espacio*; J. Vilardell: *Bombas antibúnker nucleares, Apuntes y Hace*; M.^a Rosa Zapatero Osorio: *La muerte de las estrellas comunes*; Luis Bou: *Las formas del espacio*; José M. García de la Mora: *Origen de los celos*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Alfred T. Kamajian

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

Copyright © 2004 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2004 Prensa Científica S. A. Muntaner, 339 pral. 1.^a 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X

Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

...cincuenta años

PSICOLOGÍA ECONÓMICA. «La noción de 'saturación' del mercado se basa en anticuadas hipótesis psicológicas que, a su vez, parten de una analogía con los impulsos biológicos: si un animal, supongamos, tiene hambre, estará motivado para buscar comida; tras haber comido, el motivo desaparecerá. El concepto de saturación ha conducido a terribles predicciones acerca del futuro de la economía de EE.UU. (véase *ilustración*). Señalan algunos la gran proporción de familias estadounidenses que ya poseen artículos de entidad, por ejemplo un frigorífico (más del 80 por ciento), y aducen que en el futuro las ventas estarán mayormente limitadas a la reposición de lo que se gaste. Pero los móviles sociales son diferentes de los biológicos. Consequir un objetivo conduce a pugnar por otro.»

LA ESTRUCTURA DEL ADN. «J. D. Watson y yo, en la Unidad del Consejo de Investigaciones Médicas en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, estábamos convencidos de que podríamos acercarnos algo a la estructura del ADN construyendo modelos a escala basados en los patrones de rayos X obtenidos por M. H. F. Wilkins, Rosalind Franklin y sus colaboradores del King's College, de Londres. La hipótesis más importante que tuvimos que formular se refería a que la iteración cristalográfica no coincidiese con la repetición de las unidades químicas en la cadena, sino que se mostrara a intervalos mucho más largos. Una explicación posible era que todos los enlaces de la cadena eran iguales pero que los rayos X captaban cada décimo enlace, digamos, desde el mismo ángulo, y los demás enlaces desde ángulos diferentes. ¿Qué suerte de cadena podría producir un patrón así? La respuesta era fácil: la cadena podría estar arrollada en hélice. —F. H. C. Crick» (Nota de la redacción: por este trabajo, Crick, Watson y Wilkins ganaron el premio Nobel en 1962.)

...cien años

CAMBIO DE FUERZA MOTRIZ. «El vapor cae en desuso. La energía hidráulica avanza. El cambio se debe a la distribución de la electricidad. En centenares de pueblos y ciudades de todo el país, los motores de vapor han sido desplazados por la energía hidráulica transmitida eléctricamente. Así, por ejemplo, en Concord (New Hampshire), los talleres del ferrocarril

que transporta todo el carbón que llega a la ciudad trabajan mediante motores eléctricos de unos 550 caballos y la planta de vapor que antes hacía ese trabajo está parada. La energía eléctrica conseguida de la energía hidráulica está sustituyendo al vapor, no tanto porque sea más limpia, más segura y más higiénica para la salud, sino porque es más barata.»

...ciento cincuenta años

CAZA INVERNAL DE LA BALLENA. «Por los esquimales se enteraron los balleneros de que las ballenas recalaban en ciertas ensenadas del estrecho de Davis y de la bahía de Baffin, donde buscan abrigo durante el invierno. Esa información sugirió al capitán Penny la idea de organizar destacamentos que inviernaran en las regiones polares para hacerse con el mayor número posible de ellas en el otoño y la primavera, extrayendo su aceite durante el invierno. Así pues, a tal fin se aprestaron dos naves que se hicieron a la vela en Aberdeen el 13 de agosto de 1853, con una tripulación de 33 marineros y tres grumetes. El éxito recompensó sus esfuerzos, pese a un frío de 40 grados bajo cero. La actividad desarrollada por los marineros contribuía a preservarles la salud, sin que a ninguno se le hicieran largos los días. Pero, por raro que pueda parecer, la letal plaga del cólera estalló entre los esquimales llevándose a muchos de ellos, mientras que los expedicionarios, sólo con leves síntomas premonitorios, quedaron exentos del morbo.»



Consumo hasta la saturación, el temor de los economistas. 1954.

TRENES BALA. «Recientemente, ante el Farmer's Club del Instituto Americano de Nueva York, el juez Meigs ha leído una ponencia en la que se afirmaba: 'El futuro conocerá ferrocarriles que seguirán una recta matemática entre parada y parada, raíles diez veces más robustos que los empleados hasta ahora, locomotoras con ruedas de un diámetro mucho mayor, digamos que de tres metros y medio a cuatro metros y medio; en vez de a ciento cincuenta kilómetros por hora, viajaremos, y con mayor seguridad, a cuatrocientos cincuenta kilómetros por hora.' Si el perímetro de las ruedas motrices fuera de 7 metros y medio (¡nada más y nada menos!), tendrían que girar a 1000 revoluciones por minuto. Como las ruedas no dan vueltas sin vapor, la caldera tendría que evaporar del orden de una tonelada de agua por minuto. ¿Cómo es posible evaporar esa cantidad de vapor en la caldera de una locomotora en ese intervalo de tiempo?»

PALEOANTROPOLOGIA

La vejez en la evolución humana

El número de seres humanos que sobrevivían hasta la vejez se multiplicó por más de cuatro hará unos 30.000 años. Unos antropólogos han examinado más de 750 muestras dentarias fósiles de homínidos pertenecientes a un período de millones de años, desde los australopitecos hasta los humanos modernos primitivos, pasando por los neandertales. Por vejez entienden haber llegado a una edad doble de la correspondiente a la madurez reproductiva (ésta suele coincidir con que salgan los terceros molares, lo que ocurre de ordinario

en la adolescencia). Al calcular en los homínidos la proporción entre individuos viejos y jóvenes, descubrieron una tendencia al aumento de longevidad a medida que ascendían por el árbol evolutivo humano. En los humanos modernos, los adultos de más edad rebasaron en número a los más jóvenes por primera vez. Puede que el aumento de longevidad haya sido fundamental para el desarrollo de la cultura humana, donde los ancianos transmiten los conocimientos y facilitan la soldadura de sociedades complejas.

—Charles Choi

ASTRONOMIA

Alrededor de Saturno

El 26 de octubre, la nave espacial Cassini se acercará por primera vez mucho a Titán, la luna de Saturno adonde la sonda Huygens, transportada por Cassini, descenderá en enero. A los pocos días de que entrase en órbita alrededor de Saturno efectuó una primera aproximación al satélite, pero se quedó a 320.000 kilómetros de Titán. En este nuevo acercamiento lo sobrevolará a sólo 1200 kilómetros de altura. Pero en sus tres primeros meses en órbita, la nave ha logrado ya varios descubrimientos. Ha hallado nuevas lunas de Saturno. Las dos primeras, anunciadas en agosto, se encuentran entre los satélites Mimas y Encélado, y su envergadura es sólo

tres y cuatro kilómetros. Puede que el Voyager ya vislumbrara una de ellas. En septiembre se anunciaba el hallazgo de un cuerpo, o quizá dos, a mil kilómetros del borde exterior del fino y peculiar anillo F, uno de los más externos. De tratarse de un satélite y no de una concentración ocasional de materia, sería el número 34; mediría cuatro o cinco kilómetros y estaría menos de 300 kilómetros de la órbita de la luna Pandora. Ahora bien, al intentar precisar su órbita con nuevas imágenes, pareció que entraba en el anillo F. Esto sería extraño, así que cabe dentro de lo posible que se tratase de un segundo cuerpo. Al mismo tiempo se descubría un débil anillo asociado a la órbita de otra luna, Atlas. Se encuentra entre los anillos A y F; su ancho es de 200 kilómetros y se ignora si rodea por completo a Saturno. Cassini ha detectado también un nuevo cinturón de radiación, sobre las nubes más altas del planeta y el anillo D, y un halo luminoso que rodea a Titán, emitido por el metano y el monóxido de carbono de su atmósfera. Se esperaba verlo de día, excitados los gases por el Sol, pero ha sorprendido que resplandezca en el infrarrojo cercano durante la noche. Sorprendió también, fue uno de los primeros descubrimientos nada más entrar en órbita, una abundancia mayor de oxígeno en el borde de los anillos. Se cree que es el remanente de una colisión ocurrida quizás en enero de este mismo año.

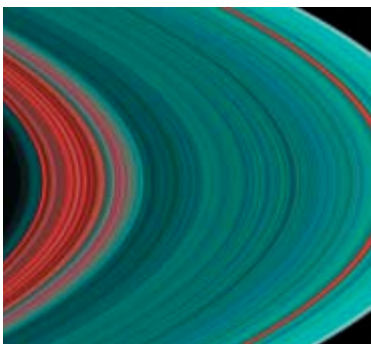


Imagen en falso color de parte de los anillos, vistos en el ultravioleta. El color turquesa indica mayor abundancia de partículas de hielo; el rojo, de partículas, más finas, de "suciedad". La gran franja turquesa es el anillo A; la fina línea roja hacia su exterior, la separación de Encke. Como se ve, hay más hielo hacia el borde externo. Hacia el interior, tras el anillo A y antes del B, se encuentra la división de Cassini, en rojo. Su abundante suciedad ha sorprendido. Recuerda al material de la luna Febe.

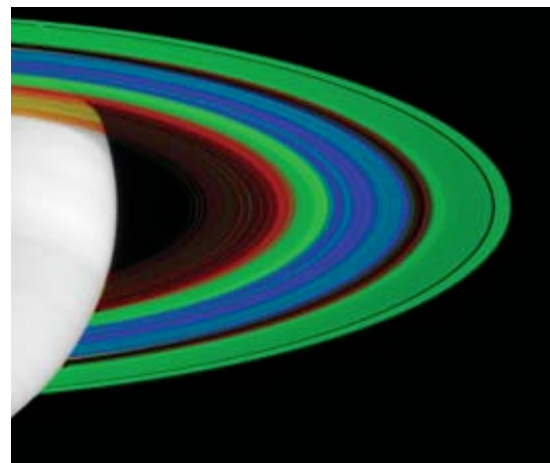


Imagen en falso color de los anillos que representa los datos recogidos en infrarrojos por Cassini el 1 de julio en la parte no iluminada, pero proyectados sobre una fotografía de la iluminada que tomó antes de entrar en órbita. El rojo representa 110 kelvin; el verde, 90; el azul, 70. Las partes más opacas, el anillo A (a la derecha, verde) y el B (azul), son más frías que las regiones más transparentes, la división de Cassini (línea roja junto a A) y el anillo C (rojo y amarillo), porque dejan pasar menos luz al interior.

OBESIDAD

Anticalóricos, pero menos

Quizá las bebidas con edulcorantes artificiales puedan alterar la percepción de la propia voracidad y, por tanto, no ayuden a adelgazar. O al menos así ha ocurrido con unas ratas de laboratorio. Ante la posibilidad de elegir entre líquidos aromatizados de muchas y pocas calorías, las ratas se muestran ávidas de sustancias más calóricas. Unos investigadores de la Universidad de Purdue alimentaron ratas con un líquido azucarado y otro endulzado con sacarina de cero calorías; confundían así la capacidad de los animales de asociar dulce y calorías. Diez días después, tras probar un aperitivo de chocolate, esas mismas ratas engulleron más alimento que otro grupo de ratas de control que no habían probado nunca la sacarina. Asimismo, puede quebrarse el vínculo entre la viscosidad del alimento y la saciedad: las ratas que recibieron un suplemento de chocolate líquido ganaron más peso que las ratas a las que se ofreció una golosina de las mismas calorías, parecida a un pudín.

—J. R. Minkel



RICHARD HAMILTON SMITH Corbis

Dulces confusiones: ¿Dificultades para perder peso?

SIDA

¿El dinero no es el problema?

Una nota de prensa del DIO —departamento del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España patrocinado por la casa farmacéutica Pfizer— informaba en agosto de sus investigaciones acerca de la posible utilidad de las estatinas como fármaco contra el virus del sida. Una de las primeras frases del comunicado decía: “La terapia antirretroviral [...] no ha conseguido detener la expansión del VIH, sobre todo en países del Tercer Mundo con pocos recursos económicos. No obstante, el mayor problema [de esa terapia] no es el precio de los fármacos, que se ha reducido notablemente en los últimos años.” A finales de 2003, por ejemplo, el precio de Combivir (AZT más lamivudina) se rebajó a sólo 0,60 dólares por día para los países más pobres; viene a ser lo que cuestan los genéricos del fabricante indio Cipla.

El monto de administrar antirretrovirales a todos los que lo necesitan en algunas de esas naciones, que antes quizá superase su producto interior bruto, con el resultado de millones de muertos, ha debido de quedarse en algunas centésimas de su riqueza nacional.

Esta transferencia de fondos al primer mundo supondría, de todas formas, un esfuerzo decenas de veces mayor, en términos relativos, que el que han de hacer los países desarrollados para atender a sus propios enfermos, con los precios originales aún vigentes entre sus fronteras, o el que les llevaría cubrir las necesidades de los países más pobres con los nuevos precios. ONUSIDA preveía, en julio de este año, que la diferencia entre los recursos necesarios para extender el tratamiento y lo que se recaudará no dejará de crecer a lo largo del decenio. Y no todo son reducciones de precios. Se quintuplicó a finales del año pasado —sólo, eso sí, en EE.UU. y para seguros privados— el precio de Norvir, fármaco que ahora se usa para potenciar inhibidores de la proteasa más recientes. Necesitan nuevos antirretrovirales quienes no responden a los ya existentes. En 2003 se aprobaba Fuzeon, el primer inhibidor de la fusión del VIH (impide la entrada del virus en la célula). Su precio, 52 euros por día, ha causado consternación. Algunos programas públicos de EE.UU. no lo costean.

ENTOMOLOGIA

Nada como el hogar

Las hormigas del desierto del Sahara defienden con ferocidad sus moradas, pero a diferencia de otros animales territoriales, lo hacen, al parecer, porque se lo ordena su propio sistema de navegación. En las cercanías de sus hormigueros, los miembros de *Cataglyphis fortis* recurren a amenazas, mordiscos y rociadas de ácido venenoso contra los extraños. Pero cuando éstos se hallan a algo más de dos o tres metros de los hormigueros, la agresividad se desvanece. Markus Knaden y Rüdiger Wehner, de la Universidad de Zúrich, enseñaron a las hormigas a acudir a comederos situados 20 metros al norte de sus nidos. Las secuestraban justo cuando llegaban allá. Al soltarlas en un campo a kilómetros de distancia, inmediatamente corrieron 20 metros hacia el sur, donde creían que se hallaban sus hormigueros. Las hormigas que consumaban ese desplazamiento mostraban una probabilidad de iniciar una pelea tres veces mayor que aquellas a las que se detenía tras haber recorrido sólo cinco metros. Los investigadores conjeturan que un sistema de navegación inherente a las hormigas calcula distancias y controla su voluntad de lucha.



La hormiga del desierto, *Cataglyphis fortis*, está presta a entrar en combate cuando se halla cerca de su hormiguero.



que un sistema de navegación inherente a las hormigas calcula distancias y controla su voluntad de lucha.

—Charles Choi

EVA WEBER (arriba, dibujo); RÜDIGER WEHNER (fotografía)

Mejora genética de cereales

La comparación de los genomas de los principales cultivos de cereales, junto con la mejora asistida por marcadores moleculares, abren el camino hacia una nueva revolución verde

Stephen A. Goff y John M. Salmeron

Durante milenios, los agricultores se han dedicado a trabajar sus tierras y mirar al cielo a la espera de un tiempo que favoreciera la cosecha. Cuando encontraban plantas que crecían sin problemas incluso en entornos adversos, resultaban especialmente prolíficas o resistentes a las enfermedades que arrasaban las cosechas vecinas, trataban de capturar sus preciados atributos mediante cruzamientos que daban lugar a nuevas plantas. Se trataba de un proceso simple, a cara o cruz. Carentes de los conocimientos y técnicas que se requieren para examinar el genoma de las plantas e identificar el origen de tales rasgos, debían conformarse con mezclar, emparejar y esperar fortuna.

A pesar de su aleatoriedad intrínseca, el método consiguió resultados notables. El desarrollo de la agricultura, que empezó hace unos 10.000 años, cuando nuestros antepasados cazadores-recolectores se asentaron, propició una explosión demográfica. En la actualidad, la población humana continúa creciendo y demanda un incremento continuo de la producción agraria.

Con todo, el 99 por ciento de la producción depende sólo de 24 especies vegetales domesticadas. De ellas, el arroz, el trigo y el maíz representan la mayor parte de la ingesta calórica mundial. Cada uno de esos tres destacados cereales se produce hoy en cantidades que exceden los quinientos millones de toneladas anuales. Para seguir alimentando a todos los habitantes del planeta, que en 2050 se calcula que alcanzarán los nueve mil millones, y suponiendo el consumo medio actual

de entre 0,4 y 1,5 kg de cereales por persona y día, la producción de estas gramíneas deberá mantener un crecimiento anual del 1,5 por ciento; y ello, en una superficie cultivable cada vez más reducida.

Los expertos estiman que la productividad de los cereales todavía no ha alcanzado su máximo. Existe, pues, un gran interés en hacer realidad ese incremento potencial y superar así los límites de la producción actual. El conocimiento más pleno de los genomas de los tres cultivos principales revela que algunas de las claves que permitirán avanzar en este camino pueden hallarse en las especies que los originaron.

Origen de los cultivos modernos

Según estudios moleculares y genéticos, el trigo, el arroz y el maíz, así como la cebada, el mijo, el sorgo y otras gramíneas, están más emparentados de lo que se creía. Ello significa que el avance en una de estas especies habrá de ayudar a comprender y, por tanto, mejorar las otras. Constituye también una fuente de posibles mejoras el acervo génico de los antepasados silvestres de nuestros cultivos, pues sus caracteres de interés agronómico pueden trasladarse, por hibridación, a las variedades modernas.

Aunque los cereales cultivados descienden de una planta ancestral común, divergieron entre sí hace entre 50 y 70 millones de años, colonizando regiones específicas. Se admite que fueron los agricultores del Creciente Fértil mediterráneo los primeros en domesticar, hace unos 10.000 años, el trigo. En el territorio

1. PLANTULAS DE ARROZ. Su ADN se analiza en busca de los genes responsables de los caracteres de interés agronómico.



que hoy corresponde a México, los campesinos habrían empezado a cultivar, un milenio más tarde, un antepasado del maíz moderno. Los chinos, por su parte, domesticaron el arroz hace más de 8000 años.

A medida que nuestros antepasados domesticaban esas plantas, fueron creando los cultivos que conocemos en la actualidad. Su método era muy similar a la mejora vegetal moderna. A partir de las variedades silvestres, propagaron de forma selectiva y cruzaron entre sí individuos con un mayor tamaño de granos, con espigas mayores o con otros rasgos deseables. Las plantas que no dispersaban sus semillas, por ejemplo, también revestían interés, pues, si bien requerían la intervención humana para propagarse, recoger su grano resultaba más fácil. Los primeros agricultores también seleccionaban las plantas por sus cualidades nutritivas; pensemos en los granos con un epicarpio fino que permitía su consumo o las variedades de maíz cuyo almidón ofrecía suficiente consistencia para hacer tortillas. De esta forma, las plantas cultivadas se fueron diferenciando de sus progenitoras. Terminaron por dejar de cruzarse con sus versiones silvestres. El maíz llegó a divergir tanto de su antepasado, el teosinte, que el parentesco entre estas dos especies se puso en tela de juicio hasta fecha reciente.

Esta modificación de los cereales mediante propagación selectiva y reproducción cruzada, iniciada en la prehistoria, no se detuvo. A lo largo de los últimos cien años, se ha venido seleccionando las plantas con el fin de aumentar el tamaño de las espigas, portadoras de semillas, y así incrementar la producción. Pero el viento dobla fácilmente



2. EL MAÍZ MODERNO Y EL TEOSINTE, su antepasado, discrepan tanto en su morfología (ilustraciones), que su parentesco se cuestionó hasta que las pruebas genéticas lo confirmaron. Mediante la multiplicación selectiva de las variedades portadoras de las características deseadas, los campesinos de la antigüedad que habitaban en el actual México favorecieron, sin saberlo, alelos que controlan el patrón de ramificación, la estructura del grano y otros atributos de la planta. Hace unos 4400 años, la dura vaina del teosinte (fotografía de la izquierda) desapareció. Las mazorcas de maíz de aspecto carnoso (fotografía de la derecha) contaban ya con los alelos que hoy controlan el depósito de proteína y la calidad del almidón en todas las variedades cultivadas.

el tallo de plantas con espigas poderosas. Hubo, pues, que cruzarlas con razas de tallo corto y así evitar el encamado. Se logró aumentar la resistencia a enfermedades, la tolerancia al estrés ambiental y una utilización más eficaz de los abonos nitrogenados; con ello, se multiplicó el rendimiento y la calidad. Fue ésta la revolución verde de los años sesenta del siglo pasado. Por citar un ejemplo paradigmático, desde 1950 la producción media de maíz en los EE.UU. ha aumentado en torno al 400 por ciento.

Pero incluso durante este período de auge, el método que utilizaban los expertos en mejora vegetal di-

fería poco del de los primeros agricultores. En su mayoría, limitaban su atención al tamaño del grano, la arquitectura de la planta u otros rasgos visibles, con objeto de seleccionar las líneas que después propagarían.

Pese a su técnica rudimentaria, los agricultores prehistóricos fueron los responsables, sin saberlo, de una selección génica. Así lo indican los estudios de los genomas de los cereales cultivados. El grupo dirigido por Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, examinó los alelos (o versiones) de algunos genes en mazorcas de maíz halladas en México, en enclaves próximos al origen de la domesticación de esta planta. A tenor de los resultados, hace unos 4400 años el maíz domesticado ya contaba con alelos que controlaban el patrón de ramificación de la planta, así como la calidad de las proteínas y del almidón; genes éstos que hoy se encuentran en todas las variedades de esta gramínea. En cambio, en el pariente silvestre del maíz, el teosinte, estos alelos están presentes en sólo del 7 al 36 por ciento de las plantas. Ello indica que la

Resumen/El acervo génico de los cereales

- La comparación de los genomas de los principales cultivos de cereales muestra el estrecho parentesco entre estas plantas. Tan limitada diversidad genética deriva de la domesticación que llevaron a cabo los campesinos de la prehistoria.
- Los alelos responsables de caracteres de interés agronómico se buscan en cultivos modernos, así como en sus parientes silvestres, mediante la identificación de las funciones de los mismos.
- El gen identificado opera entonces como marcador molecular. Merced a esta técnica, los cruzamientos tradicionales podrían acelerarse y ganar en precisión.

presión de selección que ejercieron los primeros agricultores fue rápida y de gran alcance.

De hecho, pese a trabajar de forma independiente con diferentes especies de cultivos, los actuales programas de mejora vegetal han estado seleccionando (también sin advertirlo) mutaciones en genes similares. La cartografía génica —que acota la localización probable del gen responsable de un determinado carácter en una región cromosómica, o locus— ha mostrado que muchas de las alteraciones que los humanos han provocado en los cereales modernos se hallan en loci similares en los genomas de plantas cultivadas emparentadas. Tal coincidencia se explica por las estructuras de los genomas de estos cereales, que, a pesar de los millones de años de evolución independiente, evidencian una estrecha semejanza.

Cosecha de genomas

Pertencientes a diversos cereales domésticos se han cartografiado ya varios miles de loci responsables de caracteres de interés agronómico. Ponen de manifiesto un notable grado de conservación de la estructura genómica de ese grupo de plantas. Debido a la elevada correspondencia del orden génico, o sintenia, todas estas gramíneas se adscriben a un solo sistema genético; ello significa que cualquier descubrimiento relacionado con los genes o su función en uno de tales cereales facilitará el conocimiento y mejora del resto.

El genoma del arroz (*Oryza sativa*) será el primero en secuenciarse por completo. Podría, pues, constituir la principal fuente de nuevos hallazgos. Uno de los autores (Goff) ha publicado ya un borrador de la secuencia de la subespecie *japonica* del arroz, la más cultivada en Japón y los EE.UU. Investigadores chinos han elaborado un borrador de la subespecie *indica*, la más cultivada en Asia. Se espera, por otra parte, que el Proyecto Internacional de Secuenciación del Genoma del Arroz complete una secuencia detallada de los 12 cromosomas del arroz a finales del presente año.

El genoma del arroz resulta el más fácil de abordar merced a su tamaño, mucho menor que el de los otros

cereales: su ADN consta de sólo 430 millones de pares de nucleótidos. El del maíz (igual que el humano), en cambio, cuenta con 3000 millones de pares de bases, el de la cebada con 5000 millones y el del trigo 16.000 millones. Se trabaja ya en la secuenciación del genoma del maíz; y se proyecta acometer la del trigo. En el caso del arroz, ya se han identificado decenas de miles de genes. Sin embargo, saber que un segmento de genoma corresponde a un gen nada nos dice acerca de la función del mismo.

Existen varios métodos para determinar la función de un gen. El más directo consiste en buscar coincidencias en las bases de datos que almacenan las secuencias de todos los genes conocidos. Cuando el gen que se pretende identificar es responsable de alguna actividad celular básica —lo que sucede con frecuencia— se encuentra un gen casi idéntico, u homólogo, en microorganismos o en organismos ya estudiados. Ello ocurre, por ejemplo, en 20.000 de los 30.000 a 50.000 genes del arroz; el conocimiento de la función que dichos genes cumplen en otros organismos nos facilita para predecir su misión en el arroz.

Se estima que más de mil genes intervienen en la defensa del arroz contra patógenos y plagas. Cientos de genes se han asignado a rutas metabólicas que conducen a la síntesis de vitaminas, carbohidratos, lípidos, proteínas u otros nutrientes. A partir de datos experimentales extraídos de la investigación con *Arabidopsis* y otras plantas, también se han identificado numerosos genes que regulan estas vías biosintéticas o que se hallan implicados en la floración y embriogénesis.

Y eso no es todo. Mediante micromatrices, se ha conseguido catalogar los genes que se expresan en distintos tejidos cereales. En nuestra compañía (Syngenta), por ejemplo, tras examinar 21.000 genes del arroz, se han identificado 269 que se expresan durante el desarrollo del grano. Ello sugiere que dichos genes son responsables de la constitución nutricional del grano maduro.

Existe otro método para determinar la función de un gen. Se busca silenciarlo, mediante la inserción de una mutación que interrumpe su actividad, para observar luego qué le ocurre a la planta. Pero el efecto no siempre resulta visible. En ocasiones, la planta modificada debe examinarse en busca de alteracio-

CARACTERES DE INTERES

Los caracteres de interés agronómico se agrupan en cuatro categorías: crecimiento, arquitectura de la planta, tolerancia al estrés y contenido nutricional. El incremento de la cosecha —el objetivo más anhelado en agricultura— puede lograrse mediante el aumento del tamaño o el número de granos que produce cada planta, del número de plantas que pueden crecer en un espacio determinado, o mediante el reforzamiento de la tolerancia del cultivo a condiciones adversas.

Crecimiento

Tamaño o número de granos
Tamaño de la espiga
o mazorca
Velocidad de maduración

Arquitectura

Altura
Ramificación
Floración

Tolerancia al estrés

Sequía
Plagas
Enfermedades
Herbicidas
Fertilización intensiva

Contenido nutricional

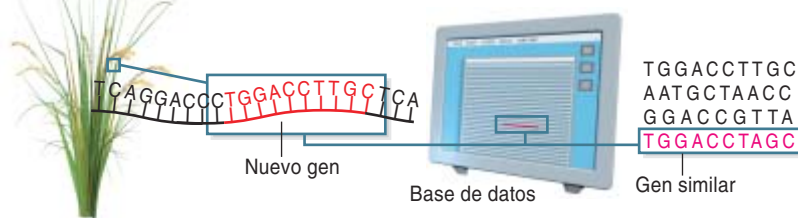
Almidón
Proteínas
Lípidos
Vitaminas



COMO AVERIGUAR LA FUNCION DE UN GEN

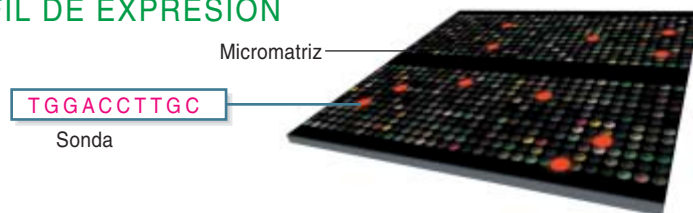
LAS MISMAS TECNICAS que se utilizan para encontrar los genes responsables de enfermedades humanas sirven también para identificar los genes que controlan los caracteres vegetales. La cartografía génica acota la localización probable de un gen en una región cromosómica; la secuenciación del ADN de ese segmento afina aún más la búsqueda. La función del gen se determina luego mediante cualquiera de las siguientes técnicas.

BASES DE DATOS



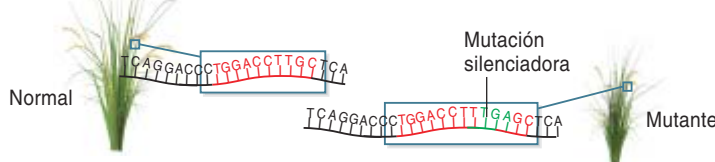
En las bases de datos que almacenan las secuencias de los genes ya conocidos, se busca una secuencia parecida a la del nuevo gen. Se obtiene así un indicio de la función del mismo. En el caso del arroz, de sus 30.000 a 50.000 genes estimados, 20.000 guardan una estrecha semejanza con genes ya estudiados en otros organismos; se les suponen las mismas funciones.

PERFIL DE EXPRESION



Los perfiles de expresión muestran cuándo y dónde se activa un gen en un organismo; información ésta útil para determinar la función del gen. Una micromatriz alberga miles de sondas, o fragmentos, de ADN. Cada sonda se aparea con una signatura de la actividad de un gen, un ARN mensajero (ARNm). Cuando las muestras de tejido vegetal pasan por la micromatriz, cualquier ARNm presente se une a su sonda complementaria, que emite luz. Si un gen se expresa sólo durante el desarrollo del grano, por ejemplo, se da por hecho que interviene en dicho proceso.

BIBLIOTECA DE MUTANTES



Los mutantes revelan la función de un gen, pues permiten observar qué ocurre cuando éste no se expresa. Para silenciar el gen en cuestión, se le inserta un pequeño fragmento de ADN durante el desarrollo de la planta. Se examina luego el pie mutante en busca de alteraciones físicas o químicas (respecto a las plantas normales), que ofrezcan pistas sobre la función del gen.

FUNCIONES DE LOS GENES DEL ARROZ

Mediante las técnicas aquí descritas se han estimado las funciones de una notable fracción de genes del arroz.



nes (más sutiles) en cualquiera de sus funciones normales, sean éstas fisiológicas, del desarrollo, de regulación interna o bioquímicas. La investigación realizada por la industria privada y por instituciones públicas ha creado colecciones de plantas de arroz y maíz mutantes, en las que se han silenciado miles de genes. Merced a estos estudios genómicos funcionales y a las comparaciones de secuencias génicas entre especies, se empieza a perfilar el número y la identidad de los genes del arroz —y, por extensión, del maíz, el trigo, el sorgo y otros cereales—, responsables del desarrollo, fisiología, metabolismo y rendimiento de la planta.

Pero determinar la función de un gen no constituye la última etapa del proceso de mejora. Debe optimizarse. ¿Cómo? Buscando un alelo superior. En el caso de un gen que controla la acumulación de almidón en el grano de maíz, por ejemplo, buscaremos una versión del gen que opere en condiciones de sequía extrema. Aunque tales alelos podrían hallarse en otras variedades modernas de maíz cultivado, las probabilidades de encontrarlos aumentan si buscamos en sus parientes silvestres. La homogeneidad génica entre los cultivos modernos constituye una consecuencia adversa de la forma en que nuestros antepasados las domesticaron. Se estima que la población que originó el maíz moderno se reducía a sólo unas 20 plantas. Mediante la selección de unos pocos individuos, que propagaron y cruzaron entre sí durante milenios, los campesinos de la prehistoria limitaron de una forma sumamente restrictiva la diversidad genética de las especies domésticas.

A partir de experimentos con plantas de tomate y de maíz, Steven Tanksley y Susan R. McCouch, de la Universidad de Cornell, han logrado los primeros éxitos en la búsqueda de alelos silvestres que podrían mejorar las cosechas. Con su trabajo han puesto de manifiesto la diversidad genética de los parientes silvestres, así como la dificultad de detectar su valioso potencial. En un experimento llevado a cabo a mediados de los años noventa, Tanksley cruzó una variedad silvestre de tomate verde pe-