



**Las nano-computadoras que
vienen y el misterioso
componente que podría
hacerlas realidad**

Dr. Gerardo Abel Laguna Sánchez
Departamento de Sistemas de Información y
Comunicaciones (DSIC)
Universidad Autónoma Metropolitana -Lerma

Abstract

An explanatory article on memristors, the fourth passive component in electrical circuits, is presented. Although the existence of this component was theoretically foreseen in 1971, it was only relatively recently, in 2008, that such a device was discovered. As we are close to reaching the physical limit for transistor miniaturization, the memristor is becoming increasingly attractive, especially as a key component for the realization of new computing paradigms, particularly those inspired by biological neural networks. If reliable nanometric memristors can be obtained, we would be on the threshold of a new technological era, with the emergence of nano-computers and nano-machines.

Keywords: Memristor, memristance, passive components, neuromorphic computing.

Palabras clave: Memristor, memristancia, componentes pasivos, computación neuromórfica.

Casi todo lo que vemos a nuestro alrededor, en materia de tecnología digital, tanto de cómputo como de información y comunicaciones electrónicas, está soportado por máquinas construidas a partir de pequeños transistores. ¿Sabías que los primeros transistores, los fabricados en 1968, median alrededor de 20 micrómetros?, es decir 20 millonésimas de un metro, o lo que equivale a tomar un milímetro, dividirlo en mil partes, y ocupar 20 de esas micro-partes. Actualmente un transistor tiene un tamaño de tan sólo 3 nanómetros, lo que equivale a dividir un micrómetro en mil partes y tomar 3 de estas nuevas nano-partes. Esto quiere decir que un transistor actual es 6,666 veces más pequeño que el primero.

Como analogía, piensa en una cancha de fútbol, de 100 metros de longitud, en proporción, si la longitud de esta cancha de fútbol fuera el tamaño del primer transistor, entonces los actuales transistores tendrían la longitud de un timbre postal. Esta dramática reducción en el tamaño de los transistores es una de las razones por las que, mientras que las primeras computadoras digitales ocupaban una habitación completa, ahora las computadoras son muchas veces más poderosas que las primeras, aunque sólo ocupan el espacio de una tarjeta de memoria SIM. Todo esto suena muy bien, pero como dijo el zorrito, en *El Principito* de Antoine de Saint-Exupéry: ¡Uhm, Nada es perfecto!

El inconveniente es que los actuales transistores son tan pequeños que próximamente ya no será posible reducir su tamaño. Además, mientras más pequeños son los transistores, más difícil es garantizar que trabajen en forma confiable. La razón de todo esto es simple, el tamaño actual ya está muy cerca del orden de magnitud del tamaño de los propios átomos que los conforman. Por ejemplo, un átomo de silicio, el material cristalino con el que se construyen los transistores, es de 0.24 nanómetros. Esto quiere decir que un transistor actual mide el equivalente de 12.5 átomos de silicio. Adicionalmente, resulta que, a esta escala nanométrica, es inevitable que los efectos de la mecánica cuántica se hagan presentes, con la consecuente emergencia de incertidumbre. En pocas palabras, a esta escala, la probabilidad de falla de un transistor aumenta significativamente. Para que tengas una idea del orden de magnitud del que estamos hablando, en el ámbito de lo nanométrico, puedes echar un vistazo a la aplicación disponible en el siguiente sitio:

<https://learn.genetics.utah.edu/content/cells/scale/>

Nuevas formas de hacer computación

Por lo pronto, en previsión de los evidentes límites físicos que enfrenta la computación actual, digital y transistorizada, algunos grupos de investigación ya están trabajando en desarrollar muy diversas alternativas para la realización del trabajo que implica todo proceso computacional. En particular, existe una rama emergente de las ciencias computacionales que se denomina cómputo neuromórfico, una disciplina que cada vez adquiere mayor protagonismo (Laguna-Sánchez, 2023).

En pocas palabras, la idea base del cómputo neuromórfico es que toma como inspiración el comportamiento de las neuronas de un tejido cerebral, donde se observa cierta ponderación de los enlaces sinápticos a fin de lograr que la neurona receptora emita su propio pulso o tren de pulsos. La versión electrónica, que de alguna forma emula este comportamiento, se denomina *red neuronal artificial de impulsos* (en inglés, *spiking neural networks* o SNNs). Como otras redes neuronales artificiales del ámbito del aprendizaje maquina (el famoso *machine learning*), las redes neuronales de impulsos también se “entrenan” a fin de poder resolver ciertos problemas específicos, sólo que en estas últimas la forma de codificar la información es mediante señales analógicas, mediante trenes de impulsos, y no en forma digital, como suele hacerse en la computación digital.

Dado que estas redes artificiales ponderan la contribución de cada conexión o “sinapsis” de sus “neuronas” mediante una resistencia, sería muy conveniente contar con resistencias “programables” y, mejor aún, con

resistencias “programables” de tamaño nanométrico. La buena noticia es que, en una fecha relativamente reciente, apenas en el año 2008, se descubrió que es posible fabricar resistencias con esas características, se denominan *memristores* y conforman el cuarto componente básico de los circuitos eléctricos (Choi, 2021).

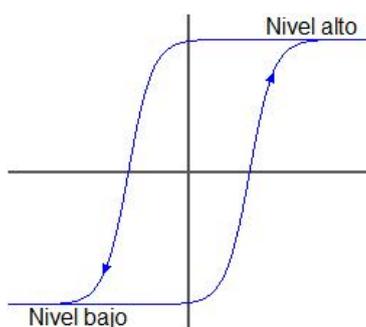
Los memristores como dispositivos programables de ínfimo tamaño

Resulta que los memristores pueden llegar a tener tamaños muy pero muy pequeños, dado que se fabrican con nanotecnología y su principio de operación tiene que ver con la creación de un pequeñísimo canal conductivo, dentro de un sustrato cristalino, a partir del agrupamiento de algunos iones (átomos con polaridad eléctrica) de elementos conductores. Nótese que, en el memristor, a diferencia de los materiales semiconductores tradicionales, lo que se mueve son átomos completos, no sólo los electrones de sus órbitas. El tamaño tan pequeño que pueden llegar a tener los memristores los hace candidatos ideales para construir sistemas de cómputo analógico de muy alta densidad en espacios muy reducidos, más que los actuales dispositivos electrónicos digitales, además de permitir el procesamiento paralelo de la información, ya que esto es mucho más natural en los circuitos analógicos, lo que, a su vez, permite disminuir los tiempos de respuesta. Incluso, se está concibiendo la construcción de neuronas artificiales a partir de memristores (Kumar, 2020).

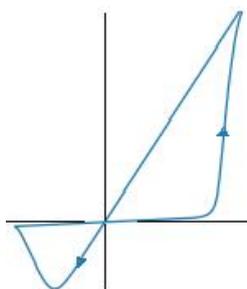
El misterioso cuarto componente de los circuitos eléctricos

El memristor es el cuarto componente de los circuitos eléctricos, entendiéndose que los otros tres son el resistor, el capacitor y el inductor, todos ellos mejor

conocidos. Resulta que los memristores son una suerte de resistencia con memoria, de allí el nombre de memristor. De hecho, presentan un comportamiento que se puede representar gráficamente mediante una curva de histéresis. Una curva de histéresis es una gráfica que resulta de graficar dos trayectorias para unir dos niveles: una trayectoria permite pasar del nivel bajo al nivel alto, mientras que la otra es la que permite retornar al nivel bajo partiendo del nivel alto. Una gráfica de histéresis típica es como la que sigue:



Las curvas características de los memristores muestran un comportamiento de histéresis más tortuoso, pero la idea es la misma: seguir una ruta en un sentido y otra en sentido contrario. De hecho, las curvas de histéresis de los memristores se caracterizan por mostrar un cruce entre las dos posibles rutas, resultando en una curva con forma de ocho o, como dicen los estudiosos de los memristores, una curva de histéresis “pellizcada”. Algo como lo que sigue:



La curva de histéresis revela cierta memoria en el comportamiento observado, en tanto que el comportamiento actual depende de la trayectoria o “historial” en los instantes anteriores. Precisamente, esta característica de memoria es lo que vuelve tan atractivos y convenientes a los memristores dentro del campo del cómputo neuromórfico, en general, y para su aplicación de las redes neuronales artificial de impulsos, en particular.

Leon Chua como profeta de los memristores

Para poder entender lo que es un memristor es necesario tener muy claro cuáles son las relaciones que existen entre los resistores, los capacitores y los inductores con las variables eléctricas involucradas. De hecho, fue justo del análisis de estas relaciones lo que le permitió a Leon Chua, un investigador de la Universidad de Berkeley, determinar teóricamente, en 1971, la posibilidad de la existencia de un cuarto componente: el *memristor*. Por aquel entonces, Leon Chua escribió (Chua, 1971, p. 519):

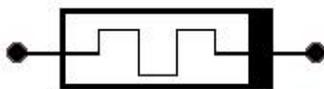
“... aunque aún no ha sido descubierto físicamente un memristor, el análisis realizado a partir de la teoría de los circuitos y de lo electromagnético cuasi-estático, hacen plausible la noción de que podría ser inventado o descubierto, en forma accidental, un dispositivo memristor.”

Y, en efecto, así ocurrió en 2008, 37 años después del pronóstico de Leon Chua, en los laboratorios de la empresa Hewlett Packard (HP), cuando el equipo liderado por R. Stanley Williams consiguió construir un dispositivo que correspondía, en cuanto a su comportamiento, con la previsión teórica que Leon Chua

había desarrollado para los memristores (Strukov, 2008).

Actualmente, existen múltiples grupos de investigación, tanto en la academia como en la industria, trabajando para obtener un memristor suficientemente maduro y poder explotarlo en forma comercial. Por ahora se trata de un sector emergente y en pleno desarrollo. El principal problema con los memristores disponibles actualmente es que su comportamiento es muy variable e inestable, tanto respecto de sí mismos, como respecto de otros dispositivos construidos en forma idéntica (Laguna-Sánchez *et al.*, 2023). Todo indica que la variabilidad es una consecuencia inherente a los efectos de la física cuántica, que se hacen presentes en estos dispositivos que trabajan a partir de la creación de canales conductivos nanométricos, conformados por escasos átomos ionizados. Si los fabricantes de componentes electrónicos llegan a fabricar memristores nanométricos confiables, estaríamos ante el umbral de una nueva era tecnológica, con la previsible irrupción y producción de nano-computadoras y de nano-máquinas.

Aunque, a la fecha, no se ha definido un símbolo esquemático estándar para el memristor, M , a continuación, se presenta el que más a menudo aparece en la literatura especializada:



Por ahora, podemos adelantar que la propiedad de resistencia con memoria se le llama memristancia y se especificarla en ohms (Ω). La explicación, con más detalle, de lo que implica la memristancia la haremos más adelante,

cuando abordemos el esquema de los cuatro componentes.

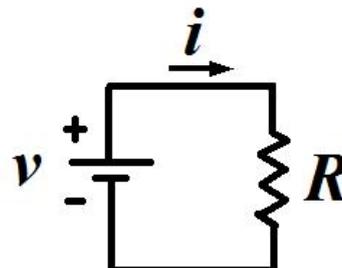
Un rápido repaso de los tres componentes pasivos que son bien conocidos

Antes de poder explicar lo que es un memristor, primero debemos repasar brevemente lo que son los otros tres componentes: el resistor, el capacitor y el inductor. Vale la pena comentar que los cuatro componentes que describiremos cuentan únicamente con dos terminales.

Comencemos por el primer componente: el resistor. Un resistor es un dispositivo cuya principal característica es que se compone de un material que, aunque conductor, presenta cierta magnitud de oposición al paso de la corriente eléctrica. La magnitud de oposición al paso de la corriente de un resistor es lo que se denomina resistencia, R , y se mide en ohms (Ω) y su símbolo en los diagramas eléctricos es el siguiente:



Si conectamos un resistor a una fuente de alimentación, de tal forma que se le aplique una diferencia de potencial en sus extremos, medida en unidades de voltios (V), entonces circulará por el resistor una corriente, medida en unidades de amperios (A). Por ejemplo, si la fuente de alimentación es una batería el circuito quedaría como sigue:



En estas condiciones, la corriente que circula por el resistor (denotada con i) es directamente proporcional a la diferencia de potencial (denotada con v) que se le aplica, e inversamente proporcional a la magnitud de la resistencia (denotada con R). Este comportamiento se expresa, en forma muy simple, mediante la denominada ley de Ohm:

$$i = \frac{v}{R}$$

Esta expresión describe, con claridad, cómo el valor de i depende directa y proporcionalmente de v , a la vez que inversa y proporcionalmente respecto de R . A saber, si v aumenta, entonces i aumenta; si v disminuye, entonces i también disminuye. Por otro lado, si R aumenta, entonces i disminuye; si R disminuye, entonces i aumenta.

Vamos ahora con el segundo componente: el capacitor. Se trata de un componente construido bajo el principio de mantener dos superficies conductoras, una frente a la otra y separadas por un material aislante, con el fin de que pueda retenerse carga debido a la natural atracción entre cargas, de signo opuesto, que se alojan en cada extremo. La idea es que, al aplicar una diferencia de potencial en sus extremos, el extremo negativo del capacitor acumulará electrones (los elementos de carga negativa), mientras que el extremo positivo se caracterizará por las cargas positivas que corresponden las vacantes que dejaron los electrones que migraron al extremo negativo. La característica que permite al capacitor almacenar energía a partir de la carga eléctrica, q , así como los efectos derivados de todo cambio en la diferencia de potencial, se le denomina capacitancia, C , y se especifica en unidades de faradios (F). El símbolo esquemático de un capacitor es el siguiente:



Más adelante, cuando estudiemos el esquema de los cuatro componentes, bosquejaremos la operación del capacitor, en términos de la diferencia de potencial, v , y de la carga almacenada, q .

Ahora toca el turno al tercer componente: el inductor. Un inductor se construye al bobinar un cable, es decir un alambre conductor con recubrimiento aislante, sobre la superficie de un cilindro cuya alma presenta cierta permeabilidad magnética. Dado que una corriente eléctrica genera automáticamente un campo magnético, como una envolvente invisible que rodea al cable, el bobinado del cable permite sumar el campo magnético de cada una de las vueltas de este. El hecho es que la envolvente magnética aumenta su densidad de flujo, φ , conforme aumenta la corriente. Una vez que se forma un campo, con una cierta densidad de flujo, basta con que se interrumpa el flujo de corriente que lo generó para que el campo magnético se repliegue al interior del cable. Este movimiento de repliegue del campo tiene la propiedad de inducir una corriente eléctrica con la misma dirección que la corriente interrumpida. Es decir, que el campo magnético acumulado por la bobina también representa un cierto almacenamiento de energía a partir de la densidad de flujo de este. Esta propiedad del inductor de almacenar energía a partir de la densidad del flujo magnético o de inducción, φ , así como los efectos derivados de todo cambio en la corriente, se denomina inductancia, L , y se especifica en unidades de henrios (H). El símbolo esquemático de un inductor es el siguiente:



La operación del inductor, en términos de la corriente, i , y de la densidad de flujo, φ , será retomada en seguida, cuando abordemos el esquema de los cuatro componentes.

El esquema de los cuatro componentes: la clave detrás del pronóstico de Leon Chua

Se trata de un diagrama que muestra a los cuatro componentes R , C , L y M , así como la relación que guarda cada uno de ellos con las variables electro-magnéticas v , i , q y φ . El esquema es el que se muestra en la figura 1.

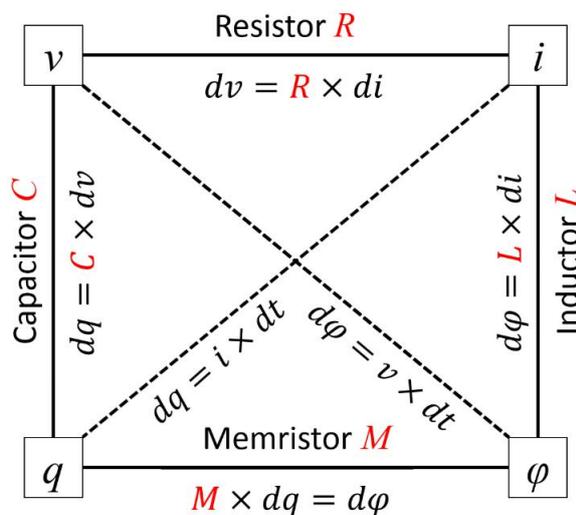


Figura 1: Esquema de los cuatro componentes.

Este esquema pudiera parecer, a primera vista, algo de difícil comprensión, pero no lo es tanto si tomamos en cuenta algunos conceptos básicos. Por su puesto que esto está debidamente soportado por el cálculo diferencial e integral pero, en aras de facilitar la exposición de la idea importante que se encuentra detrás de todo esto, relajaremos el rigor

formal en favor de una aproximación intuitiva. Lo primero, es que d es la notación empleada para hacer referencia a cambios o diferencias, mucho muy pequeños, observados en las variables. Lo segundo, es que el operador matemático que nos permite obtener la razón de cambio, en cada instante, para una cierta función del tiempo se conoce como derivada. Lo tercero y último, es recordar que el operador de derivación tiene como operador dual el operador de integración. Es decir que, para expresar que derivamos una función, f , cuyo desarrollo depende del tiempo, respecto del propio tiempo, t , hacemos:

$$\frac{df}{dt} = g(t)$$

Por otro lado, para recuperar la función original, f , a partir de la expresión de su derivada, $\frac{df}{dt}$, recurrimos al operador de integración, algo aproximado a lo siguiente:

$$f = \int g(t) dt$$

Aclarado todo esto, sólo resta comentar que en el diagrama de los cuatro componentes se asume que tanto la diferencia de potencial que se aplica a un componente, v , como la corriente que lo atraviesa, i , ambos son funciones del tiempo.

Ahora, estamos listos para explicar lo que se expone en el esquema de los cuatro componentes de la figura 1. Comenzaremos por el componente más simple de todos: el resistor. En la parte superior del esquema de la figura 1, se puede apreciar la siguiente relación:

$$dv = R \times di$$

que podemos leer como “*todo cambio en el potencial (observado en los extremos del resistor) es directamente proporcional*

al cambio en el valor de la corriente (a través del resistor), ponderada por el valor de la resistencia”. Si despejamos a di , tenemos

$$di = \frac{dv}{R}$$

que no es más que la ley de Ohm, llevada al límite, para el cálculo de la corriente instantánea, que se puede leer como “el cambio en la corriente es directamente proporcional al cambio en el potencial e inversamente proporcional al valor de la resistencia”. Más aún, si ahora despejamos R , tenemos

$$R = \frac{dv}{di}$$

Dado que tanto el cambio en el potencial, dv , como el cambio en la corriente, di , están referidos al mismo incremento en el tiempo, dt , este cociente no depende del tiempo y, por lo tanto, la resistencia, R , es una magnitud constante e invariante en el tiempo.

Vamos ahora con el capacitor, cuyas relaciones se muestran en el lado izquierdo del esquema de la figura 1:

$$dq = C \times dv$$

que podemos leer como “el cambio en la carga (almacenada en el capacitor) es directamente proporcional al cambio en el potencial (observado en los extremos del capacitor), ponderado por el valor de la capacitancia”. Esta expresión también implica que, en un capacitor, la carga almacenada en el mismo depende esencialmente del potencial que se le aplica en sus extremos. Es el turno del inductor, cuyas relaciones se muestran en el lado derecho del esquema de la figura 1:

$$d\phi = L \times di$$

que podemos leer como “el cambio en la densidad de flujo (en el campo

magnético que envuelve al inductor) es directamente proporcional al cambio en la corriente (que circula por el cable de este), ponderada por el valor de la inductancia”. Esto también implica que, en un inductor, la densidad del flujo magnético que lo rodea depende esencialmente de la corriente que circula por su cable devanado.

Eureka

Finalmente, podemos explicar las relaciones que explican el funcionamiento de un memristor. Sus relaciones aparecen en la parte inferior del esquema de la figura 1. En su momento, en 1971, Leon Chua analizó las relaciones que hemos descrito aquí y se percató de que nada impedía que pudiera existir un componente en el que se produjera un cambio en la densidad del flujo como resultado, directamente proporcional, de un cambio en la carga de este. Esta relación de proporcionalidad directa podría estar, además, ponderada por la magnitud que él denominó memristancia, M . Veamos las implicaciones de la conjetura de Leon Chua. Entonces, tenemos que las relaciones fundamentales del memristor se expresan como

$$M \times dq = d\phi$$

que podemos leer como “el cambio en la densidad de flujo del memristor es directamente proporcional al cambio en la carga de este y ponderado por el valor de la memristancia”. Todo esto suena un poco extraño: se trata de un componente que, de alguna forma, almacena energía mediante carga eléctrica y que, al mismo tiempo, almacena energía en la densidad de un campo magnético. Vamos a manipular la expresión para ver si podemos llegar a una expresión más intuitiva. En el esquema de la figura 1, observamos que se colocan dos relaciones que cruzan el espacio entre las variables, se trata de las siguientes relaciones:

$$dq = i \times dt$$

y

$$d\varphi = v \times dt$$

Si las arreglamos para que describan a la corriente y al potencial, respectivamente, tenemos:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

y

$$v = \frac{d\varphi}{dt}$$

que no son más que la tasa de cambio instantáneo para la carga (lo que se traduce en una corriente) y la tasa de cambio instantáneo para la densidad de flujo (lo que se traduce en un potencial), respectivamente. Estas expresiones sí nos ofrecen mayor intuición sobre lo que ocurre, ya que, en efecto, una corriente es el resultado de un cambio de carga en un cierto tiempo. Por otro lado, un cambio de densidad de flujo magnético en un cierto tiempo, en efecto, está vinculado a la inducción de una fuerza electromotriz que se mide en voltios. Ahora veamos lo que ocurre si sustituimos las relaciones de los cruces en la expresión del memristor. Sea

$$M \times dq = d\varphi$$

Tomando en cuenta que

$$dq = i \times dt$$

y

$$d\varphi = v \times dt$$

Podemos jugar con estas relaciones haciendo:

$$M \times i \times dt = v \times dt$$

y acomodar para dejar como

$$M = \frac{v \times dt}{i \times dt}$$

Luego, asumiendo que el incremento en el tiempo, dt , es el mismo, tanto para el numerador como para el denominador, entonces queda

$$M = \frac{v}{i}$$

que, bajo el supuesto inicial de dependencia temporal de v e i , se puede expresar como

$$M(t) = \frac{v(t)}{i(t)}$$

un cociente cuya forma es la misma que la que determina la ley de Ohm para el cálculo de la resistencia:

$$R = \frac{v}{i}$$

Por lo tanto, $M(t)$, es una expresión que arroja el valor de la resistencia instantánea para el memristor. ¡Eureka! Ya queda clara la diferencia entre un simple resistor y un memristor: mientras que la resistencia, R , es una magnitud constante e invariante en el tiempo (no cambia a lo largo del tiempo), la memristancia M , sí es una función del tiempo (su desarrollo depende del tiempo. Tanto la resistencia como la memristancia se miden en unidades óhmicas (Ω), pues en los dos componentes se presenta una magnitud de oposición al paso de la corriente, solo que en el resistor se mantiene constante, mientras que en el memristor cambia conforme transcurre el tiempo.

Referencias

- [1] Choi, C., Brainwave: If memristors act like neurons, put them in neural networks, *Online IEEE Spectrum*, 2021. <https://spectrum.ieee.org/memristor-random>
- [2] Chua, L., Memristor-The missing circuit element, *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, no. 5, pp. 597–519, 1971. <https://doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337>

- [3] Kumar, S. *et al.* Third-order nanocircuit elements for neuromorphic engineering, *Nature*. Vol 585, No. 24, pp. 518-523. Sep. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2735-5>
- [4] Laguna-Sánchez, G., *Cómputo neuromórfico: actualidad y perspectivas*, *Contactos, Revista de educación en ciencias e ingeniería*, No. 128, enero-marzo, pp. 19-35, CDMX, 2023. ISSN: 2683-2607. En línea: <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/270>
- [5] Laguna-Sanchez, G.; Lopez-Guerrero, M. and Barron-Fernandez, R., The probabilistic behavior of the set and reset thresholds in Knowm's SDC memristors: Characterization and Simulation, *IEEE Latin America Transactions*, Vol.21. No. 12, pp. 1266–1274, 2023. e-ISSN 1548-0992. DOI: 10.1109/TLA.2023.10305237. En línea <https://latamt.ieeeer9.org/index.php/transactions/article/view/8308>
- [6] Strukov, D. *et al.*, The missing memristor found, *Nature*, vol. 453, pp. 80–83, 2008. <https://doi.org/10.1038/nature06932>