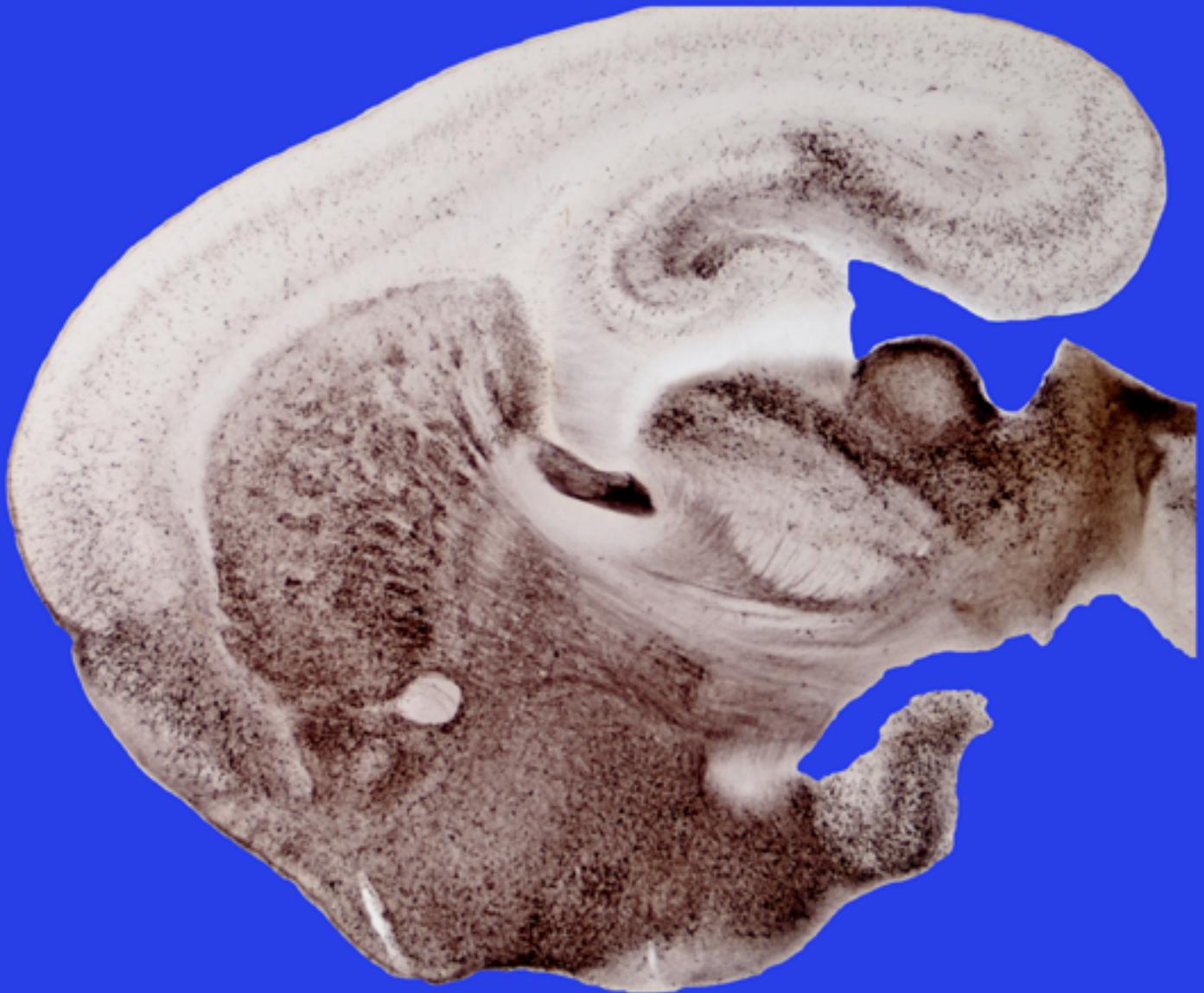


ENCUENTROS EN LA BIOLOGIA



Editor:

Salvador Guirado

Comité editorial:

Ramón Muñoz-Chápuli,
Antonio de Vicente,
José Carlos Dávila,
Francisco Cánovas,
Francisca Sánchez

Editado con la financiación del
Vicerrectorado de Investigación y
Desarrollo Tecnológico de la
Universidad de Málaga.

El Centro de Profesorado de Málaga
colabora en la distribución de esta
publicación.

Diseño de la portada:

Salvador Guirado

Correspondencia a:

Encuentros en la Biología,
Salvador Guirado (Editor),
Depto. Biología Celular,
Facultad de Ciencias,
Campus de Teatinos,
29071 Málaga
Tfno.: 952 131961
email: guirado@uma.es

Dirección Internet:

[http://www.uma.es/publicaciones/
encuentros](http://www.uma.es/publicaciones/encuentros)

D.L.:MA-1.133/94

3 La asimetría bilateral como indicador de inestabilidad del desarrollo

*Jacint Ventura es Profesor Titular de Zoología en la
Universidad Autónoma de Barcelona.*

5 ¡Cuidado con las interferencias!

*Miguel Ángel Medina Torres es Profesor Titular de
Bioquímica y Biología Molecular en la UMA.*

7 Ande yo caliente y riase la gente

*Francisco Manuel Cazorla López es Ayudante en el Dpto.
de Microbiología de la UMA.*

LA ASIMETRÍA BILATERAL COMO INDICADOR DE INESTABILIDAD DEL DESARROLLO

Jacint Ventura

El efecto que la inestabilidad del desarrollo (ID) tiene sobre la asimetría de las estructuras bilaterales de animales y plantas es un tema de interés creciente en muchos contextos ecológicos y evolutivos. Así lo atestiguan las diversas monografías que en las dos últimas décadas han ido sintetizando e interpretando, bajo diferentes puntos de vista, la información existente al respecto (véase, por ejemplo, Zakharov and Graham (eds), *Acta Zool. Fenn.*, 191: 1-200 [1992]; Møller and Swaddle, *Symmetry, Developmental Stability, and Evolution*, Oxford University Press, Oxford [1997]; Polak (ed), *Developmental Instability. Causes and Consequences*, Oxford University Press, Oxford [2003]). Valga el presente artículo como una escueta presentación a este problema biológico. Para comprender la esencia de las complejas relaciones entre ID y asimetría resulta conveniente considerar, en primer, lugar toda una serie de cuestiones conceptuales ligadas i) al control de las pequeñas alteraciones aleatorias que tienen lugar durante el desarrollo y ii) a los diferentes tipos de asimetría bilateral. Veamos a continuación algunos referentes básicos al respecto.

Canalización y estabilidad e inestabilidad del desarrollo. Cuando las condiciones ambientales cambian, los organismos y las poblaciones deben también modificarse a fin de resistir la presión de dichas variaciones, de tal modo que el desarrollo de los individuos puede verse alterado en mayor o menor grado. En estas situaciones, la producción de fenotipos consistentes se halla muy condicionada a la canalización y a la estabilidad del desarrollo, conceptos estrechamente relacionados entre sí e implicados, aunque de modo diferente, en el amortiguamiento de las perturbaciones que aparecen durante la morfogénesis. El primer término se refiere al proceso que permite la producción de un fenotipo específico bajo diferentes condiciones ambientales y genéticas; se trata, en definitiva, de una propiedad del genoma que tiende a asegurar que una vía de desarrollo permanezca dentro de una trayectoria adecuada. El segundo concepto corresponde específicamente a un resultado, en concreto al que se obtiene tras la actuación de los procesos que resisten o atenúan los accidentes de una trayectoria de desarrollo dentro de un ambiente particular. En este mismo contexto se sitúa también la noción de ID, que es

entendida como el resultado del conjunto de pequeños accidentes estocásticos que tienden a alterar la precisión del desarrollo dentro de un ambiente determinado. Debe tenerse en cuenta que aunque estabilidad e inestabilidad del desarrollo parezcan *a priori* conceptos contrapuestos en realidad no lo son, dado que mientras el primero contempla un proceso que debe tener una base genética, el segundo se refiere exclusivamente a un fenómeno no genético. Sin embargo, sobre esta última cuestión hay que puntualizar que si bien se tiende a aceptar que la heredabilidad de la ID es muy baja, existen algunos trabajos que apuntan en la dirección contraria, de tal modo que en un meta-análisis efectuado recientemente se señala que es necesario disponer de más información para poder ofrecer una conclusión realmente sólida al respecto.

Tipos de asimetría bilateral. Se han descrito tres modalidades de asimetría en estructuras morfológicas bilaterales (Van Valen, *Evolution*, 10: 139-146 [1962]): antisimetría, asimetría direccional y asimetría fluctuante (AF). Es importante subrayar que, si bien la estabilidad del desarrollo y la asimetría son características individuales, dichos patrones de variación bilateral solamente pueden ser definidos en términos estadísticos dentro de un contexto poblacional.

Antisimetría. Constituye una modalidad de asimetría bilateral en la que existen diferencias morfológicas significativas entre lados, pero en el que el flanco con el carácter de mayor magnitud varía al azar entre individuos. Por ejemplo, en los cangrejos del género *Uca*, el macho tiene la pinza de un lado mayor que la del opuesto y eso acontece aproximadamente con idéntica frecuencia en los dos costados en casi todas las especies; en estos casos no se puede predecir que flanco tendrá una pinza mayor. Lo mismo ocurre, por ejemplo, con la posición relativa de las partes superior e inferior del pico de *Loxia curvirostra* y con la disposición de la estructura que actúa a modo de vela en algunos cnidarios, como *Physalia physalis* y *Velella velella*. La antisimetría se detecta mediante pruebas estadísticas aplicadas a la distribución de la diferencia entre los valores de los lados derecho e izquierdo (D-I) y que evalúan las desviaciones de la normalidad hacia la platicurtosis o hacia la bimodalidad; la media de (D-I) es generalmente cero.

Asimetría direccional. Es un patrón de variación en el que también se registran diferencias

significativas entre lados, pero en el que el costado con el carácter de mayor magnitud siempre es el mismo. Valgan como ejemplos la asimetría corporal de los lenguados, la de la cola de algunas aves y la de muchos órganos internos de los mamíferos (los arcos arteriales, los pulmones, los testículos, etc.). Los valores de (D-I) presentan una distribución normal alrededor de una media que es significativamente mayor o menor que cero.

Asimetría fluctuante. En esta configuración la simetría es el estado más frecuente y no hay una tendencia a que el carácter de un lado tenga mayor magnitud que la del opuesto. Se trata de una asimetría sutil en la que la media de (D-I) es cero y la variación de dicha diferencia se distribuye normalmente alrededor de dicho valor. Resulta de la incapacidad de presentar un desarrollo idéntico en ambos flancos y constituye un patrón de variación que puede tener orígenes diversos.

Relaciones entre la ID y la asimetría bilateral. Puesto que el desarrollo de las estructuras bilaterales en ambos lados del cuerpo está bajo el control de un mismo conjunto de genes que, además, actúan en las mismas condiciones ambientales, la asimetría puede constituir un reflejo de la existencia de accidentes en el desarrollo inicialmente programado. No obstante, la relación que guarda la ID con los diferentes tipos de asimetría bilateral es de distinto orden. Cuando existe asimetría direccional o antisimetría los individuos están dirigidos genéticamente o durante el desarrollo a ser asimétricos, por lo que en ambas situaciones la variación de (D-I) es el resultado de una mezcla compleja de causas genéticas y no genéticas. De este modo, ambos patrones de variación resultan ser estimadores poco efectivos de la ID. Sin embargo, algunos autores han sugerido que estas modalidades de asimetría bilateral pueden ser usadas también a tal efecto. En particular, existen estudios que demuestran que, bajo una intensa selección direccional, la asimetría puede cambiar sus propiedades estadísticas; de AF a asimetría direccional o a antisimetría. Consecuentemente, puesto que estos dos últimos patrones de variación bilateral pueden ser el resultado de un desarrollo alterado, es posible que en esas circunstancias constituyan un reflejo de ID. En una tesis distinta se encuentra la AF, ya que existe un importante consenso en que sus niveles son indicativos de la magnitud de las pequeñas perturbaciones al azar que acontecen durante el desarrollo. Así, se considera que la evaluación de los valores de AF es un procedimiento adecuado para la detección de ID, en el sentido de que ambos factores están correlacionados positivamente. Dado que esta asociación ha sido

objeto de múltiples estudios y que en algunos casos los resultados obtenidos han sido criticados debido a defectos de índole metodológica, durante los últimos años se ha desarrollado y perfeccionado el procedimiento de análisis estadístico muy exigente y sofisticado para poder evaluar con precisión y fiabilidad las diferencias de AF entre grupos de individuos.

Las investigaciones realizadas en diversos ámbitos de la biología han puesto de manifiesto que los niveles de AF pueden variar significativamente como respuesta a la acción de diversos factores de carácter extrínseco (ambiental) o intrínseco (genético).

Inestabilidad del desarrollo y factores extrínsecos. Cuando un organismo está sometido a condiciones ambientales subóptimas, la eficiencia energética se reduce y las vías que conducen a la estabilidad del desarrollo se desorganizan debido a que la energía correspondiente es dirigida hacia otro destino. La exposición a ese tipo de hábitats da lugar a un incremento del gasto energético (estrés ambiental), fenómeno que va asociado a un aumento de la ID y, por tanto, de la AF. Diversos agentes ambientales pueden dar lugar a numerosos errores en el desarrollo. Así, por ejemplo, se ha comprobado que el estrés audiogénico, la temperatura extrema, la presión parasitaria y la exposición a contaminantes ambientales producen un aumento de la AF. En consecuencia, esta modalidad de asimetría ha sido empleada repetidamente como un biomarcador del estrés ambiental provocado por causas antrópicas. Esta cuestión no está tampoco exenta de controversias ya que, para algunos investigadores, el potencial de la AF en dicho ámbito es bajo y los resultados que pueden obtenerse en el medio natural son poco realistas y de escasa utilidad debido a la gran cantidad de factores que pueden verse implicados en la variación de los valores de AF. No obstante, lo que sí parece claro es que, si se sigue un procedimiento riguroso, este tipo de asimetría puede ser contemplado como un primer indicador de que una población puede estar en riesgo. Además, en comparación con otros bioindicadores, la AF tiene la ventaja de ser la medida no intrusiva de aplicación más simple y económica para determinar la calidad de un ambiente.

Inestabilidad del desarrollo y factores intrínsecos. La capacidad de un organismo para corregir sus vías de desarrollo frente a la producción de errores al azar puede verse afectada por la acción de diversos procesos genéticos, tales como la hibridación, las mutaciones y una intensa selección direccional. Sirvan, a modo de ejemplo, algunos aspectos referentes al efecto que tiene el

primero de estos factores sobre la ID. Cuando existe intercambio genético entre poblaciones se considera que la heterocigosis (diferencia total o parcial entre los pares de alelos de un genotipo) y la coadaptación genómica (coordinación entre *loci*) son agentes muy asociados al mantenimiento de la estabilidad del desarrollo de los híbridos. Estudios al respecto, ya sea en un contexto inter- o intraespecífico, han puesto de manifiesto, a partir de análisis comparativos de los niveles de AF, que la desorganización de la coadaptación genómica aumenta la ID. Se piensa que la importancia de las perturbaciones que acontecen durante el desarrollo en los híbridos depende del grado de diferenciación genéticas entre los taxones implicados y, en las poblaciones naturales, del tiempo transcurrido desde que tuvieron lugar los primeros cruzamientos. En contraposición a estas apreciaciones, numerosas investigaciones han puesto de relieve que híbridos de grupos genéticamente diferenciados pueden presentar un desarrollo estable, incluso en los casos en que aquéllos muestran una reducción de la fertilidad o de la viabilidad. En estas situaciones, el papel que deben jugar otros procesos genéticos sobre la ID han de ser tenidos muy en cuenta. Concretamente, se ha propuesto repetidamente que niveles de heterocigosis altos van asociados a una menor ID, circunstancia atribuida al efecto amortiguador que la dominancia alélica tiene sobre los accidentes en el desarrollo. No obstante, hay que decir que la existencia de una correlación positiva entre heterocigosis y estabilidad del desarrollo constituye un tema polémico puesto que para algunos autores no está sólidamente fundamentada. En este sentido, se ha sostenido que dicha asociación se ha establecido en muchos casos a partir de observaciones

indirectas basadas en la detección de mayores valores de AF en grupos de homocigotos y en donde las conclusiones se han establecido prescindiendo del efecto que sobre dicho parámetro pueden tener otros factores, tales como el estrés ambiental, la historia evolutiva de las poblaciones o la misma coadaptación genómica. Debe tenerse en cuenta, además, que algunos de estos agentes pueden actuar de manera contrapuesta sobre la ID y que ciertas situaciones pueden ser realmente complejas debido a la aparición de mutaciones y/ o la existencia de una selección direccional efectiva.

Finalmente, hacer tan sólo un breve apunte al hecho de que la AF ha sido empleada frecuentemente como medida de la condición o de la eficacia biológica de los individuos. De hecho existe una rica bibliografía sobre las relaciones entre ID y la eficacia biológica, entendida ésta en términos de supervivencia, éxito reproductivo y circunstancias ambientales. Puesto que los resultados obtenidos en este sentido son muy heterogéneos y en muchos casos contradictorios, dicha cuestión constituye actualmente uno de los temas de debate más encendido en el campo de la biología evolutiva. Para obtener un visión general y actualizada al respecto así como una mayor información sobre las demás aspectos aquí esbozados recomiendo atender especialmente a las revisiones citadas al inicio de este artículo. Cualquier consulta de esas monografías permitirá constatar rápidamente que el binomio ID/AF es un tema complejo y sobre el que todavía quedan muchas incógnitas por resolver. Todo ello hace presagiar que dicha relación seguirá siendo objeto de investigación permanente durante los próximos años.

¡CUIDADO CON LAS INTERFERENCIAS!

Miguel Ángel Medina Torres

Uno de los más fascinantes hallazgos de los últimos años en relación con los mecanismos de regulación de la expresión génica es la interferencia selectiva que pueden ejercer ciertas moléculas de RNA. Y no es sólo un hallazgo fascinante, sino que sus implicaciones tanto en investigación básica como aplicada son tan profundas que, en unos pocos años, se ha situado en la vanguardia de la investigación biológica. De hecho, la influyente revista *Science* situó los estudios de interferencia por RNA en la posición número 1 de los «Breakthrough of the Year 2002», lo que viene a significar que fue el tema de investigación (entre

todas las áreas de las ciencias) más «impactante» de dicho año.

El conocimiento de que existen mecanismos que pueden interferir en la expresión génica no es algo nuevo. En concreto, hay que remontarse a los años setenta, cuando se identificó la denominada *respuesta de interferón*. Entre las respuestas inmediatas que puede generar la infección vírica, se encuentra la liberación de diversas citoquinas por las células afectadas. Entre estos productos se encuentran los interferones, que pueden dar lugar a una respuesta de bloqueo generalizado de la expresión génica. Obviamente, la respuesta al

interferón funciona como un mecanismo de seguridad. Sin embargo, la interferencia por RNA es un mecanismo de control mucho más sutil que permite el bloqueo selectivo de la expresión de genes específicos.

Los antecedentes se remontan a 1990, año en el que, con un mes de diferencia, aparecieron dos artículos en la revista *Plant Cell* que mostraban que, en petunias con flor púrpura, la inserción de copias adicionales del gen de su pigmento nativo no sólo no intensificaban la coloración de las flores sino que dieron lugar a plantas con flores variegadas, con manchas blancas (Napoli *et al.*, *Plant Cell* 2: 279-289, 1990; Koes *et al.*, *Plant Cell* 2: 379-392, 1990). Los autores de estos trabajos concluyeron que las copias extras habrían despertado la censura de los genes del pigmento púrpura tanto nativo como inserto. A esta censura doble se le denomina *cosupresión*.

El experimento decisivo fue realizado en colaboración por los grupos de los Dres. Andrew Fire y Craig Mello y publicado en 1998 (Fire *et al.*, *Nature* 391: 806-811, 1998). En este trabajo, los autores inyectaron RNA monocatenario o bicatenario de un gen implicado en la función muscular (*unc-22*). Las copias de RNA monocatenario sentido o antisentido apenas produjeron efectos en los gusanos. Por contra, el RNA bicatenario sorprendentemente inhibía específicamente la expresión del gen *unc-22* dando lugar a gusanos con serios problemas de espasmos musculares. Esta inhibición fue denominada *interferencia por RNA (RNAi)* y se identificó posteriormente en otros organismos.

Tanto en animales como en plantas, la interferencia por RNA se caracteriza por la presencia de fragmentos de RNA de unos 22 nucleótidos que son homólogos al gen cuya expresión es suprimida. Estas secuencias de unos 22 nucleótidos se denominan RNA interferentes pequeños (siRNA) y sirven como *secuencias guía* que «instruyen» a un complejo supramolecular con actividad nucleasa para destruir moléculas de mRNA específicas. A este complejo supramolecular se le ha denominado *RISC* (complejo silenciador inducido por RNA). Si en RISC se produce un adecuado emparejamiento por complementariedad entre un mRNA y un siRNA específico para él, la actividad nucleasa de RISC corta en dos (de aquí que se hable de actividad *slicer*, es decir, «rebanadora») la cadena de mRNA, haciéndola afuncional. En enero de 2001, se publicó un artículo que describía la identificación de una nucleasa perteneciente a la familia de RNasas III como

responsable de la generación de los siRNA mediante el «troceado» de moléculas de RNA bicatenarias largas (Bernstein *et al.*, *Nature* 409: 363-366, 2001). Por tal motivo, a dicha nucleasa se le ha denominado *dicer* («tajadora»).

Los siRNA proceden de los mismos tipos de genes o regiones genómicas que terminan por quedar silenciados. Sin embargo, se ha identificado *microRNAs* (miRNA) que proceden de genes cuya única misión es producir estos RNA reguladores. De hecho, en el genoma humano se han identificado 255 genes que codifican miRNA, lo que representa casi un 1% del genoma completo. Por otra parte, se ha comprobado que la RNAi puede ejercerse sobre el propio genoma nuclear, regulando el grado de empaquetamiento de regiones específicas de la cromatina, impidiendo así su transcripción.

Los mecanismos de interferencia por RNA dotan a los organismos que lo poseen de una poderosa herramienta de protección frente a la inestabilidad en sus genomas que podrían provocar los transposones o las secuencias génicas foráneas incorporadas por infección vírica. Por otra parte, parece evidente que dicho mecanismo esté destinado a jugar un papel clave en el desarrollo y en procesos patológicos.

Metodológicamente, la RNAi proporciona una herramienta excepcional para analizar sistemática y rápidamente la función de miles de genes, bloqueando específicamente la expresión de cada uno de ellos y estudiando los efectos que dichos silenciamientos específicos provocan. Se trata de una herramienta metodológica potencialmente tan poderosa que en menos de dos años las principales compañías suministradoras de productos y reactivos para biología molecular la han incorporado a sus catálogos. Como lógica consecuencia, el número de artículos publicados que describen el silenciamiento de genes específicos utilizando métodos basados en la RNAi está aumentando exponencialmente.

Sin embargo, alguna «mancha» tenía que aparecer antes o después en esta bonita historia. Y así ha sido. En efecto, dos artículos publicados en 2003 alertan que la interferencia por RNA podría tener también efectos adversos activando genes de la ruta de respuesta al interferón (Sledz *et al.*, *Nature Cell Biol* 5: 834-839, 2003; Bridge *et al.*, *Nature Genetics* 34: 263-264, 2003). Estas observaciones justifican que terminemos con la advertencia que da título a este comentario: *¡Cuidado con las interferencias!*

ANDE YO CALIENTE Y RÍASE LA GENTE

Francisco M. Cazorla López

La temperatura es uno de los parámetros físicos más fascinantes desde el punto de vista biológico, ya que rige estrechamente la presencia o no de vida en los distintos hábitats. Este papel fundamental de la temperatura para la vida también ha sido aprovechado por los científicos, y fue Louis Pasteur quien en el siglo XIX observó que la alteración de los alimentos estaba asociada a la presencia de microorganismos, y descubrió que el tratamiento con calor podía ser usado para matar a aquellos microorganismos que deterioraban ciertos productos. Posteriormente, una serie de experimentos adicionales condujeron a este francés a determinar que las temperaturas del orden de 110°C destruían a todas las bacterias, negando así la entonces popular teoría de la generación espontánea. Pasteur también encontró que una hora a 120-125°C era suficiente para matar aquellas esporas fúngicas más recalcitrantes. De esta manera surgieron los estándares de la esterilización como producto de una de las mentes científicas más inquisitivas de la microbiología. Así, en los autoclaves actuales la combinación de presión y vapor hasta alcanzar temperaturas de 121°C, realizada tal y como Pasteur lo hacía hace más de 100 años, consigue matar las formas de vida más resistentes que se conocen.

Lo que Pasteur jamás podría haber predicho es que, más de un siglo después, se aislaría de una fuente hidrotermal submarina, la cepa 121 de la especie *Pyrodictium occultum*, un microorganismo perteneciente al grupo de las arqueas, y que parece decir aquello de “ande yo caliente y ríase la gente”, ya que no sólo podría crecer a temperaturas de 121°C, sino que puede sobrevivir incluso a temperaturas tan altas como 130°C, elevando así el récord de la máxima temperatura para el crecimiento y supervivencia de cualquier forma de vida [Kashefi y Lovley, *Science* **301**, 934 (2003)].

El área volcánica submarina desde donde se ha aislado la cepa 121 de *P. occultum* proporciona un hábitat natural para los microorganismos termófilos. Hay chimeneas de vapor con temperaturas que superan los 400°C, pero la vida microbiana necesita agua en estado líquido. A la presión atmosférica normal, la ebullición limita a 100°C la temperatura máxima de los ambientes acuáticos habitables. Sin embargo, la presión hidrostática del fondo oceánico eleva el punto de ebullición y se han obtenido valores de hasta 350°C en fuentes hidrotermales submarinas. Algunos organismos pueden vivir en fuentes termales superficiales con temperaturas hasta el punto de

ebullición, pero a medida que aumenta la temperatura, suele disminuir la diversidad. Las paredes de la chimenea, compuesta de metales sulfurosos ofrecen grandes y a veces escarpados gradientes de temperatura. La temperatura del interior de las columnas de agua puede llegar a ser superior a los 400°C, mientras que el agua marina exterior está a una media de 5°C, generándose en estas zonas un gradiente de temperatura de varios cientos de grados en pocas decenas de centímetros. Así, las plantas y animales quedan excluidos a temperaturas por encima de los 50°C, y los microorganismos eucariotas (protozoos, hongos y algas) a partir de los 60°C. Los procariotas fotosintéticos (cianobacterias y anoxifotobacterias) se excluyen por encima de los 90°C, pero las arqueas termófilas aumentan su diversidad entre 90°C y 100°C [Brock, *Science* **230**:132-138 (1985)].

Además, la investigación de la estabilidad de las moléculas frente a la temperatura ha evolucionado paralelamente al estudio en el campo de la termofilia, y parecía estar estancada en los últimos cinco años, dejando algunas preguntas fundamentales sin responder. Hasta que el trabajo llevado a cabo por Kashefi y Lovley [Kashefi y Lovley, *Science* **301**, 934 (2003)] disparó de nuevo el debate sobre los mecanismos que dictan la capacidad (o incapacidad) de un organismo para crecer a altas temperaturas. El análisis estructural de las proteínas de estos microbios indica que la estabilidad conformacional podría no ser el factor limitante, ya que se han caracterizado proteínas con una gran termoestabilidad, con valores de T_m por encima de 130°C [Adams, *Annu. Rev. Microbiol.* **47**:627-658 (1993)]. Por otro lado, estudios realizados hace 20 años mostraron que los aminoácidos naturales son razonablemente estables a nivel químico a temperaturas de alrededor de 150°C, pero se degradan en minutos e incluso segundos a 250°C [White, *Nature* **310**:430-432 (1984)]. De esta manera, la estabilidad conformacional de las proteínas y la inherente estabilidad química de sus constituyentes aminoacídicos sugiere que los hipertermófilos no presentarían sistemas que incrementan la actividad de la reparación estructural proteína a proteína o a su resíntesis, con el consecuente costo energético. Lo mismo podría aplicarse a otros constituyentes tales como coenzimas y metabolitos de bajo peso molecular [Cowan, *Trends in Microbiol.* **12**:58-59 (2004)].

Se ha sugerido que las moléculas pequeñas, no las macromoléculas, dictan el límite superior de temperatura para la vida. Esta visión está basada

en observaciones sobre intermediarios metabólicos clave, como los cofactores de nicotinamida, que son muy inestables a temperaturas tan bajas para un termófilo como 95°C. La cepa 121 podría constituir un buen modelo para el estudio de proteínas termoestables y el análisis de mecanismos putativos de la estabilización de cofactores (como la canalización molecular) o la propensión a depender de moléculas activas alternativas más estables, como las proteínas Fe-S en vez del cofactor nicotinamida.

La importancia de este hallazgo radica en que el límite superior de temperatura para la vida es un parámetro clave para delimitar dónde y cuándo pudo acontecer la vida en un planeta Tierra joven y muy caliente; también podría aclarar la

profundidad a la que la vida podría existir en las capas más profundas bajo la superficie de la Tierra; y por último, valorar el potencial para la vida en ambientes extraterrestres de altas temperaturas.

¿Y qué pasa con el límite superior para la vida en sí mismo? Parece improbable que el hallazgo de la cepa 121 sea el punto final de esta investigación. La mayoría de investigadores están de acuerdo en que el verdadero límite superior de temperatura para la vida se encontraría hipotéticamente donde se vuelva insostenible el límite energético impuesto por los sistemas de reparación molecular y la resíntesis de moléculas, y esto probablemente ocurre en la región de los 140-150°C. Pero, aun entonces...¿podría algún microorganismo decir aquello de “ande yo caliente”...?