

¿Podría Michael Phelps ser campeón de natación si tuviera las dimensiones de un organismo microscópico?

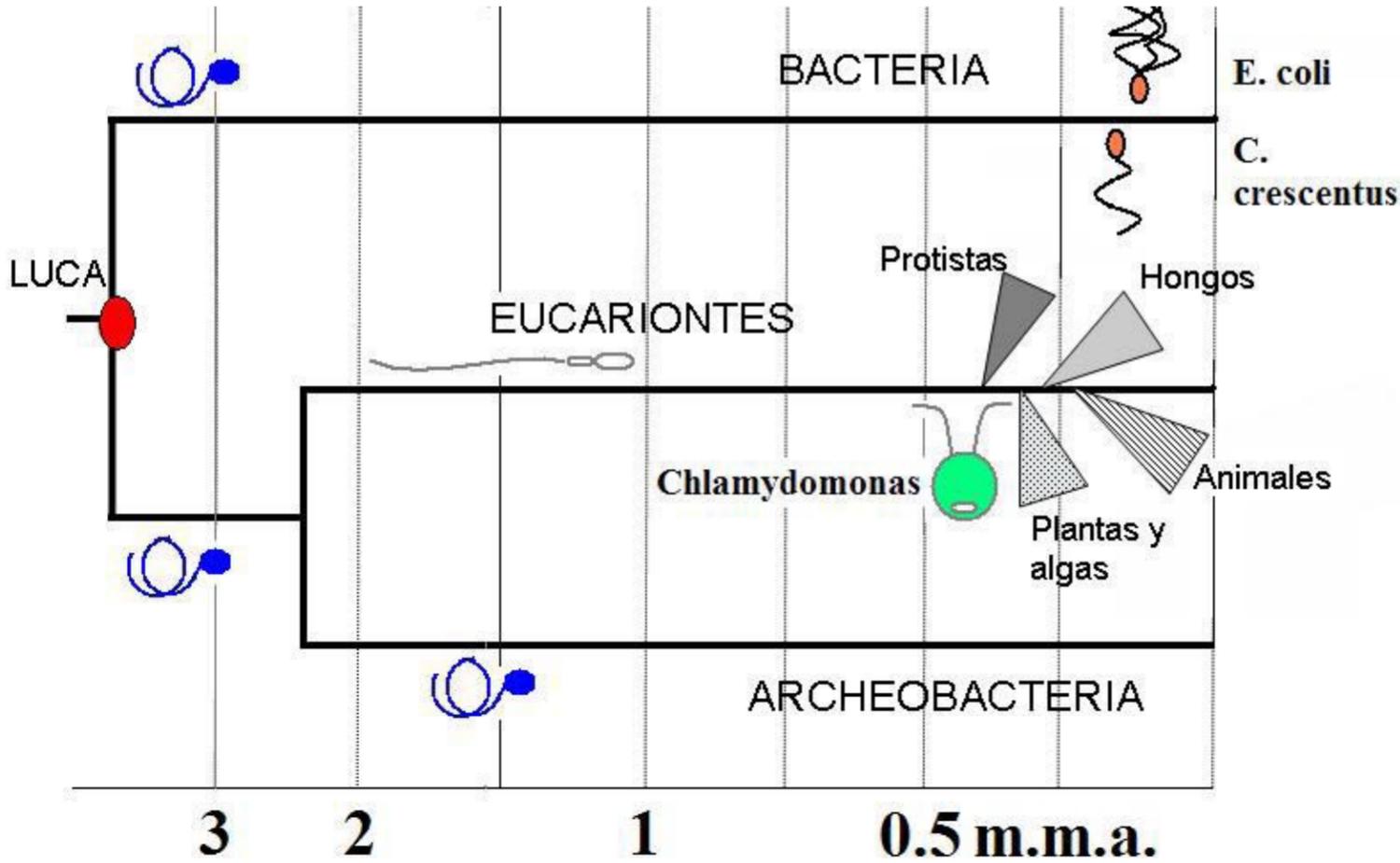


Figura 1. El árbol de la vida. La abreviatura m.m.a. significa miles de millones de años. Los organismos impulsados por el flagelo helicoidal (LUCA incluido) están señalados por la estructura en forma de resorte de color azul.

Verónica Lira
Facultad de Ciencias, UAEM

Federico Vázquez
Facultad de Ciencias, UAEM
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos

Nuestro mundo se encuentra lleno de células y microorganismos que viven nadando en medios diversos. Los espermatozoides de diferentes especies, las bacterias que habitan nuestro intestino delgado, los protozoarios que viven en el agua estancada y las algas microscópicas del océano, son sólo algunos ejemplos de la enorme gama de seres que tienen que nadar para alimentarse, reproducirse y huir de sus depredadores. Sin embargo, el nado no es igual para un ser de pequeñas dimensiones que para uno grande. Aquí hablaremos de las estrategias de los seres microscópicos para desplazarse en el agua y de las ventajas de cada una de ellas. Las relacionaremos con la evolución de los microorganismos y, de paso, explicaremos qué tendría que hacer Michael Phelps (quien posee varias medallas olímpicas en estilos diversos de nado) para continuar siendo el mejor nadador del mundo y campeón de natación si fuera un habitante del micromundo. Iniciaremos

por mencionar el hecho de que las estrategias para nadar de los organismos más grandes, como los peces, los insectos y Michel Phelps ¡son completamente inefectivas para los pequeños! Por ejemplo, cualquier intento de moverse a pequeña escala proporcionando *momentum* al fluido, como ocurre al usar un remo para impulsar la barca o al dar una brazada vigorosa en la alberca, se ve atenuado muy rápidamente por la fricción viscosa en el caso de un nadador pequeño. Un nadador humano se desplaza ayudado por su inercia debido a que el agua no opone mayor resistencia a su avance, pero para los organismos microscópicos es completamente al contrario. Si

quisiéramos emular a gran escala las condiciones que dominan el movimiento de un organismo pequeño, debemos imaginar a un nadador tratando de moverse en ¡una alberca de miel! Sus movimientos serían muy lentos, de unos pocos centímetros por minuto, de manera que avanzaría tal vez un par de metros en unas dos semanas si utilizara sus estrategias usuales (ver más adelante).

Muchos nadadores microscópicos usan uno (o más) apéndices, llamados flagelos, para propulsarse. El flagelo puede ser un filamento un poco rígido, que en el caso de las bacterias es movido por un motor rotativo localizado

en la pared celular, como en *Escherichia coli*, que es una bacteria que habita en nuestro intestino. El diámetro del flagelo es aproximadamente de 20 nm (el nanómetro, nm, es la millonésima parte del metro) y describe una helicoidal cuya longitud de contorno es de 10 μm (el micrómetro, μm , es la millonésima parte de un metro). El flagelo también puede ser un filamento flexible que realiza movimientos como los de un látigo impulsado por la acción de motores moleculares distribuidos a lo largo de él, como es el caso de los espermatozoides de muchas especies. Estos son los dos diseños básicos de los propulsores de los nadadores microscópicos. Todos los demás son variaciones de estas dos es-

tructuras. Una de estas variantes, que es fascinante, es el flagelo de la bacteria *Caulobacter crescentus*, el cual cuando rota en el sentido de las manecillas del reloj impulsa hacia adelante a la bacteria, y cuando lo hace en sentido contrario la impulsa hacia atrás (¿o al revés?). En algunos casos la célula posee varios flagelos. La habilidad de las células para nadar mediante el uso de flagelos es una característica que se ha mantenido desde el origen de la vida en nuestro planeta, que tuvo lugar hace 3,500 millones de años (m.a.) aproximadamente. Todas las formas de vida que lo han habitado, las actuales y las extintas, evolucionaron a partir de un organismo primigenio que los científicos llaman el último ancestro común universal (LUCA, por las siglas del inglés "Last Universal Common Ancestor"). LUCA tenía características que están presentes en las células de todos los organismos actuales, es decir, una membrana que separa a la célula de sus alrededores y que brinda un medio acuoso interno que alberga al material genético, que contiene la información necesaria para que la célula pueda alimentarse, crecer y dividirse. LUCA tenía además, un flagelo helicoidal. En la figura 1 se muestra un bosquejo de las ramas del árbol de la vida que ilustra, a grandes rasgos, el desarrollo de la diversidad biológica. En dicha figura hemos colocado pequeñas imágenes de algunos de los organismos que hemos mencionado y que serán los personajes del análisis que sigue.

Las ecuaciones físicas que describen el nado de las células y los microorganismos por medio de flagelos se conocen como las ecuaciones de Stokes (un connotado físico del siglo XIX). Ellas permiten demostrar lo que se conoce como Teorema de la Almeja, el cual es un resultado muy importante que nos dice

CONTINÚA EN LA PÁG. 30



Figura 2. El teorema de la almeja.

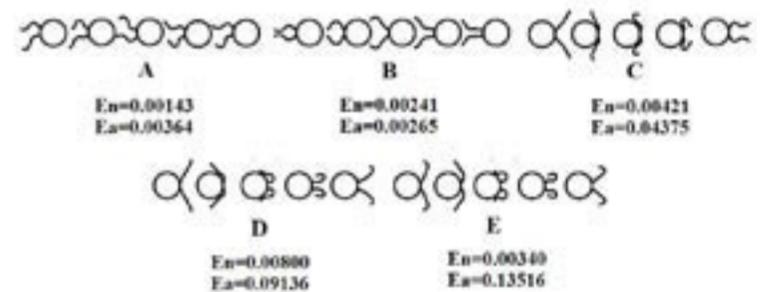


Figura 3. *Chlamydomonas* (que está representada por el círculo con dos filamentos –que son los flagelos-) nadando. En todos los casos el nado mostrado es de izquierda a derecha. "En" es la eficiencia de nado y "Ea" es la eficiencia de alimentación. Ver el texto para más detalle.

VIENE DE LA PÁG. 28

que un movimiento en el mundo microscópico resulta en un desplazamiento efectivo sólo si es *no recíproco*. Este es un concepto un tanto difícil de explicar, pero trataremos de ilustrarlo con una imagen. La figura 2 muestra a un bicho imaginario: el nadador de Purcell (físico ganador del premio Nobel, que originó en 1977 el interés por el movimiento de los seres pequeños). Este bicho, que tomamos del artículo original de Purcell, tiene dos patas rígidas que puede mover en los puntos donde se encuentran sendas bisagras o pivotes. Para que los movimientos de las patas de este nadador lo impulsen, deben ser no recíprocos. Para entender esto pedimos al lector que siga de izquierda a derecha, y después en el sentido inverso, la secuencia del movimiento de las patas del nadador de Purcell marcada como recíproca. El lector notará que se reproduce la misma sucesión de posiciones de las patas del nadador. En contraste, si se hace la misma operación en la secuencia del movimiento no recíproco notará que NO se reproduce la misma sucesión de posiciones de las patas. ¿Qué relación tiene todo esto con el nado de los organismos microscópicos que nos interesan? Una tan sorprendente como intrigante: la estrategia que desarrollaron los microorganismos durante la evolución para desplazarse eficientemente fue nadar de manera NO RECÍPROCA. Volveremos a este punto muy pronto.

Tratemos ahora de contestar una pregunta aparentemente sencilla. ¿Tiene relación la eficiencia energética de los dos modos básicos del nado de los organismos descritos con su adaptación al medio? Primero, definiremos la eficiencia como la fracción de energía que se utiliza efectivamente para lograr un propósito. En el caso del movimiento por medio de flagelos, el cálculo de la eficiencia requiere de sofisticados modelos hidrodinámicos que deben incluir una descripción detallada de los recursos de locomoción del nadador. Estos estudios están reportados en la literatura especializada, y aquí nos referiremos a algunos resultados para microorganismos con un sólo flagelo y después para biflagelados, o sea aquéllos con dos flagelos. El orden que elegimos no es el cronológico porque las dos primeras especies que utilizaremos como ejemplos (*C. crescentus* y *E.coli*) aparecieron hace 120-150 m.a. La tercera, un biflagelado del género *Chlamydomonas*, lo hizo hace alrededor de 470 m.a. La razón es que las primeras se impulsan

con un movimiento helicoidal de su(s) flagelo(s) que evolucionó antes que el del látigo de los biflagelados (ver la figura 1).

La relación que queremos establecer aquí es entre la eficiencia de nado y la adaptación de un organismo a su ambiente. Para ello, diremos que un organismo está bien adaptado a su medio cuando su eficiencia, desplegada al realizar una actividad determinada, es cercana a la eficiencia óptima con que es posible realizar la misma actividad. Los modelos físicos no sólo permiten calcular la eficiencia para determinados patrones de movimiento flagelar, sino también la forma óptima de hacer el movimiento. *C. crescentus*, por ejemplo, es una bacteria que se adaptó a vivir en ambientes con baja concentración de nutrientes. Consume muy poca energía y su nado es uno de los más eficientes del micromundo. En el caso de los monoflagelados con movimiento flagelar de látigo, el prototipo es el espermatozoide. El movimiento del flagelo es básicamente de tipo ondulatorio. Se han hecho cálculos de la eficiencia del nado como una función de la morfología del espermatozoide expresada como la relación L/L_0 , siendo L la longitud del flagelo y L_0 la de la cabeza. Es sorprendente el hecho de que el número de especies con valores de L/L_0 que van de 10 a 14 es justamente la región donde la eficiencia de nado presenta un máximo. ¿Qué hay del movimiento ondulatorio del flagelo en cuanto a si es o no recíproco? ¿Es no recíproco!

La especie prototípica de los biflagelados es *Chlamydomonas*, que muestra la peculiaridad de mover sus flagelos tanto en la forma ondulatoria como en la que podríamos llamar del nadador de pecho. En la figura 3 se pueden observar ambos patrones. A y B son de tipo ondulatorio y los de C a E del tipo nado de pecho. Las eficiencias del nado (E_n) y de la procuración de alimento (E_a) están anotadas en la parte inferior de cada secuencia de movimientos. Todos los modos mostrados se han observado en *Chlamydomonas*, excepto el que está marcado con la letra C. Notemos que el movimiento marcado con D es el más eficiente tanto para el nado como para la procuración de alimento. El lector puede observar, siguiendo la secuencia D en un sentido y en el inverso que el movimiento es ¡no recíproco! La velocidad óptima calculada del desplazamiento de *Chlamydomonas* en los casos A y D es muy aproximada a los valores experimentales encontrados

que son de $U^A = 50 \mu\text{m/s}$ y $U^D = 150 \pm 50 \mu\text{m/s}$, respectivamente. Esto indica que *Chlamydomonas* se mueve con una eficiencia cercana a la óptima. La alta coincidencia entre los valores teóricos con los valores experimentales indica que mucho de la esencia de su nado está capturada por los modelos físicos empleados en los cálculos. Con base en esto, podemos decir que *Chlamydomonas* está bien adaptada a su medio. Esta conclusión se refuerza al observar que el movimiento de los flagelos de *Chlamydomonas* en el modo de nado de pecho es también el más eficiente para procurarse alimento. Los organismos con un sólo flagelo generan corrientes menos efectivas para acercarse los nutrientes. Recapitemos lo dicho hasta ahora y saquemos algunas conclusio-

nes. El mecanismo de locomoción de LUCA, el flagelo helicoidal, lo heredaron todos los microorganismos que evolucionaron a partir de él, hace aproximadamente 3,500 m.a. Una de las ramas surgidas de LUCA dio origen a organismos impulsados por un flagelo tipo látigo como los espermatozoides. Escogimos, para contestar a nuestra pregunta básica (relación entre eficiencia energética del nado y adaptación) a tres especies representativas: *Caulobacter crescentus*, *Escherichia coli* y *Chlamydomonas*. Esta última posee flagelos helicoidales, mientras que las dos primeras poseen un flagelo del tipo látigo. Curiosamente, todas se mueven no recíprocamente y están bien adaptadas a su medio, es decir, la eficiencia de su nado es muy próxima a la óptima. Una conclusión, por tanto, es que el

proceso de selección natural tiende, por principio, a favorecer la supervivencia de individuos cuya eficiencia energética es cercana a la óptima. Pero no hay que perder de vista que ésta última depende de las condiciones específicas del ambiente en que vive la especie. Pero más importante: con ello, la selección natural borró del mapa evolutivo a aquellos organismos que pretendieron abrir paso en la difícil vida del micromundo ¡nadando recíprocamente!

Para que un microorganismo se desplace debe realizar secuencias de movimientos no recíprocas. De nada le serviría hacerlo como los seres de grandes dimensiones cuando patean, aletean, bracean, etc. Si Michael Phelps tuviera el tamaño de un microorganismo seguiría siendo campeón ¡sólo si nadara no recíprocamente!



CONVOCATORIA

La Academia Mexicana de Ciencias y la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, a través de la Escuela de Técnicos Laboratoristas y la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, convocan a la:

XX Olimpiada Estatal de Química

Este concurso anual tiene como propósito impulsar el estudio de la química en nuestro estado y seleccionar a los mejores alumnos del nivel medio superior para integrar la delegación que representará al Estado de Morelos en la XXI Olimpiada Nacional de Química que se realizará en febrero del 2012.

La XX Olimpiada Estatal de Química se llevará a cabo en dos etapas:

- ✓ 1ª. Concursos regionales.
- ✓ 2ª. Selección y entrenamiento de la delegación de Morelos.

BASES

Podrán concursar los jóvenes que estén inscritos actualmente en el ciclo escolar 2011-2012 en alguna institución de enseñanza media superior en el Estado de Morelos y que hayan nacido después del primero de agosto de 1992.

Los estudiantes podrán participar en dos niveles diferentes:

Nivel A: Para alumnos que cursen el 3º año de enseñanza media superior o que hayan participado en la anterior olimpiada de química.

Nivel B: Para alumnos de 1º o 2º año de enseñanza media superior que participen por primera vez en la olimpiada de química.

Informes e inscripciones en los correos buzontecclab@uaem.edu.mx y eduardogarciaram@gmail.com. La fecha límite de inscripción es el 5 de octubre del 2011.

Para mayores informes comunicarse con:

Cuernavaca: Q.I. Lilia Catalán Reyna. Esc. de Técnicos Laboratoristas. Tel 3-29-70-45

catalan@uaem.mx, lyacat@hotmail.com

Q.I. Eduardo García Ramírez. eduardogarciaram@gmail.com