

Recibido: 26.01.2018 | Aceptado: 25.02.2018

Palabras clave:Asimilación, evolución, genética, plasticidad fenotípica y Waddington.

Genes y factores ambientales: una forma de impulsar la evolución

SANTIAGO CASTILLO ESPARZA

scastillo@ifisica.uaslp.mx

POSGRADO EN CIENCIAS INTERDISCIPLINARIAS, UASLP

CARLOS ESPINOSA SOTO

c.espinosa@ifisica.uaslp.mx

INSTITUTO DE FÍSICA, UASLP

Las dafnias, o pulgas de agua, son crustáceos casi microscópicos que cambian su morfología en respuesta a un rastro químico que emiten sus predadores; en ausencia de éstos, las poblaciones de dafnia son más numerosas y los individuos más pequeños. En cambio, cuando estos bichos crecen expuestos a la

señal que liberan sus predadores, presentan una forma claramente distinta y un volumen mayor (figura 1); estos cambios las hacen menos susceptibles a los depredadores (Lüning, 1992). A través de este sistema de respuesta, ajustan sus características a las exigencias del ambiente.

En el caso de las pulgas de agua nos referimos como fenotipo a la morfología de los bichos, pero en general puede ser cualquier rasgo o característica presente en un organismo. Así pues, un fenotipo es desde la presencia o la estructura de una proteína hasta la forma, tamaño o color de un ser vivo. Decimos que existe plasticidad fenotípica cuando algún factor ambiental, como la presencia de predadores en el caso de las dafnias, induce el desarrollo de un fenotipo distinto.

Son innumerables los ejemplos de cómo el ambiente es una parte fundamental en el desarrollo de los organismos, pero entre los más llamativos podemos encontrar la determinación del sexo dependiente de la temperatura en peces, reptiles y anfibios. Por citar un caso particular, Bieser y Wibbels (2014) describen que todas las tortugas de orejas rojas (*Trachemys scripta elegans*) que salen de huevos y se incubaron a menos de 26 °C son machos. En cambio, si los huevos se mantuvieron a más de 31 °C, 100 por ciento de las crías serán hembras. La tortuga de orejas rojas es un ejemplo de que la plasticidad fenotípica no es una ventaja para todos los organismos en cualquier ambiente. El cambio climático acelerado por la actividad humana hace que disminuya la cantidad de machos y pone en riesgo de extinción a esta especie, y a muchas otras en las que la temperatura determina el sexo de los individuos.

Otro ejemplo fascinante del papel tan importante que juega el medio ambiente en el desarrollo lo



Figura 1.

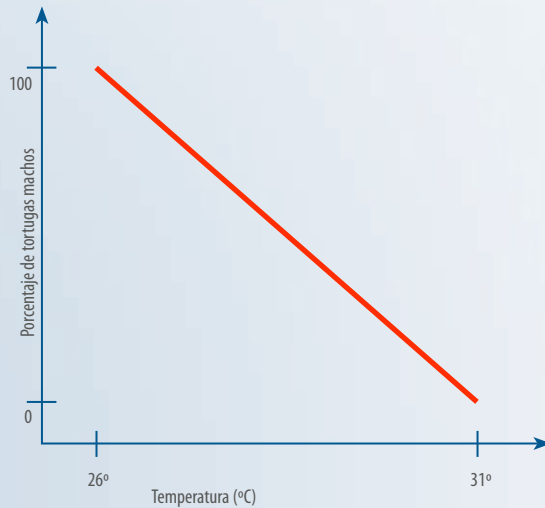
Formas características de *Daphnia longicephala* cuando se desarrolla *a)* en un ambiente libre de predadores y *b)* bajo el estímulo químico emitido por los predadores. [Imagen de Linda Weiss/CC BY]

encontramos en la abeja melífera. Las abejas obreras y la abeja reina de una colonia son genéticamente indistinguibles, sin embargo, la segunda es más grande y 20 veces más longeva que sus hijas o hermanas. No obstante, la diferencia más importante es que la reina es la única capaz de reproducirse (Barchuk *et al.*, 2007). Todas estas diferencias son consecuencia de la dieta: la abeja reina se alimenta toda su vida exclusivamente con jalea real, mientras las abejas obreras sólo la comen durante una pequeña parte de su etapa larvaria.

Así como la temperatura y la dieta, también la presión, la humedad, la luz y cualquier otro factor ambiental pueden jugar un rol determinante en la formación de los fenotipos. La manera de representar cómo las características de los seres vivos dependen del ambiente es mediante normas de reacción (cuadro 1). Éstas nos indican la forma en que el fenotipo de un organismo con una cierta combinación de genes responde a distintas condiciones ambientales. Este tipo de representaciones pueden ser útiles para estudiar la forma en que genes y ambientes colaboran para producir los fenotipos.

Las normas de reacción permiten establecer la influencia de un factor ambiental en la construcción de las características de los organismos, es decir, nos dejan visualizar cómo es la plasticidad fenotípica.

Una norma de reacción es una curva asociada a la combinación de genes de un organismo que relaciona una característica fenotípica como función de un factor ambiental como temperatura, luz, alimento disponible, humedad, etcétera.



La figura de la izquierda muestra una norma de reacción como la de las tortugas de orejas rojas; en esta especie, la probabilidad de que un huevo dé origen a una hembra o a un macho depende de la temperatura en que se desarrolla.



Cuadro 1.

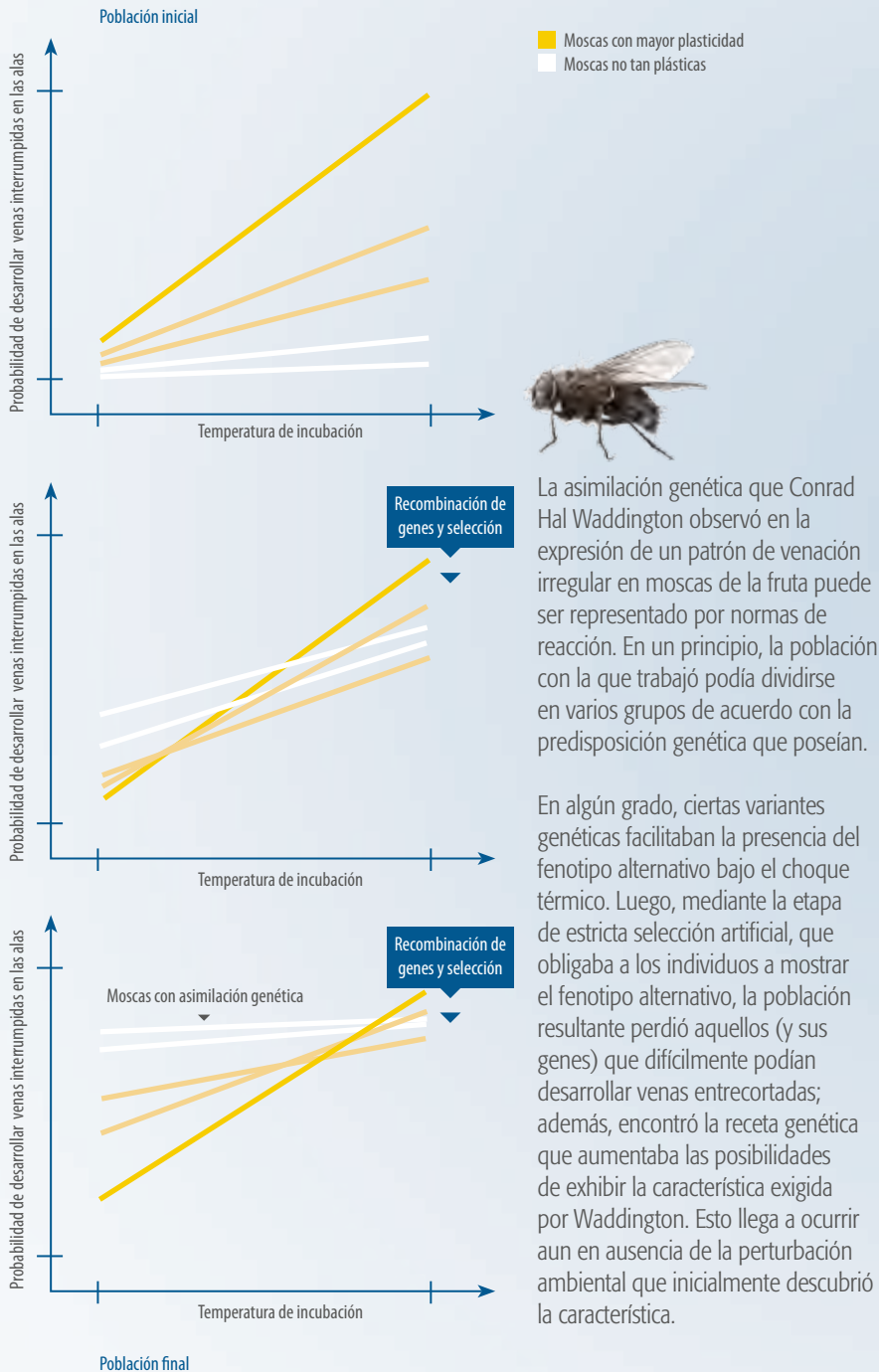
El papel de la plasticidad en la evolución

La plasticidad fenotípica implica la existencia de factores ambientales que pueden inducir la formación de variaciones en las características de los organismos. ¿Podría usarse esta capacidad de producir variación en la evolución de nuevas características? Jean-Baptiste Lamarck, un naturalista francés que publicó sus trabajos más famosos a inicios del siglo XIX, diría que sí. Él propuso que los cambios inducidos que un organismo sufre a lo largo de su vida por el ambiente pueden heredarse a sus descendientes. Para Lamarck, la plasticidad fenotípica es el principal factor que impulsa y dirige a los procesos evolutivos; hizo su propuesta de herencia de características adquiridas sin conocer la forma en que los organismos transmiten sus características a sus hijos. Para eso habría que esperar medio siglo a que el monje austriaco Gregor Mendel hiciera sus experimentos con chícharos que permitieron inferir las reglas de la herencia.

“ La temperatura, dieta, presión, humedad, luz y otros factores ambientales pueden ser determinantes en la formación de fenotipos

Lamarck influyó en sus contemporáneos y en muchos científicos en los años venideros. Charles Darwin, el evolucionista más importante en la historia, consideraba la herencia de características adquiridas de Lamarck como uno de los factores que produce la variación en el fenotipo que requiere su celebrado mecanismo de selección natural. Actualmente, sabemos que Lamarck estaba equivocado: las características que un organismo adquiere a lo largo de su vida no se transfieren a su descendencia, sólo las que están codificadas en las secuencias genómicas se transmiten a los hijos. Por ejemplo, los hijos de alguien no serán más fuertes sólo porque ese alguien dedicó su tiempo libre al levantamiento de pesas en lugar de dedicarlo a jugar videojuegos. No obstante, el efecto de la plasticidad fenotípica en la evolución puede darse por rutas que no son lamarckianas.

Conrad Hal Waddington fue un científico inglés que realizó contribuciones importantes en muy diversas áreas de



El experimento de Waddington y la mosca de la fruta

Las moscas de la fruta tienen en sus alas engrosamientos que reciben el nombre de venas. Waddington encontró que cuando exponía a un grupo de moscas a una temperatura alta durante cierta fase de su desarrollo, en algunas de ellas se producían alas ligeramente diferentes. En éstas el patrón de venación era distintivo: las venas de las alas no se formaban completas, de modo que esta variación, inducida por una temperatura alta, se debía entonces a plasticidad fenotípica. Además, simuló en el laboratorio un proceso evolutivo en que las moscas con venas interrumpidas tenían una ventaja para sobrevivir o reproducirse; para lograrlo permitió que se reprodujeran únicamente aquellas que tenían el patrón de venación alternativo.

Con las hijas de estas moscas, Waddington creó una nueva generación que sometió también a un choque térmico en la misma etapa de desarrollo. En esta generación algunas tenían venas incompletas en las alas. De nuevo dejó reproducirse solamente a aquellas con las alas raras y mantuvo por varias generaciones estos ciclos de reproducción, choque térmico y selección. El resultado final de este trabajo a muchos sigue asombrándonos, ya que se encontró que, después de varias generaciones de evolución en el laboratorio, las moscas desarrollaron alas con venación interrumpida, incluso sin haber estado expuestas a choque térmico. Este resultado es sorprendente porque, superficialmente, parece un proceso lamarckiano. Después de todo, una característica —los patrones de venación aberrantes—

la biología, desde la paleontología hasta la biología evolutiva, pasando por la embriología y la genética. A mediados del siglo XX, este científico encontró una forma en que la plasticidad fenotípica podía tener un papel importante en la evolución de nuevas características. El mecanismo de asimilación

genética que propone Waddington, a diferencia de la evolución lamarckiana, no entra en conflicto con los conocimientos actuales y de la época en genética y biología evolutiva. Para demostrar que la asimilación genética es factible, Waddington condujo el experimento que explicamos a continuación.



inducida por un factor ambiental a lo largo de la vida de un organismo —el choque térmico— parece hacerse heredable y quedar fija en los genes de los organismos.

¿Cómo explica Waddington este proceso? Se dio cuenta de que no todas las moscas tienen la misma capacidad de producir las interrupciones en las venas ante el estímulo del choque térmico, es decir, distintas moscas tienen diferentes normas de reacción: las combinaciones de genes de algunas las hacen más propensas a producir este fenotipo ante el estímulo ambiental (cuadro 2). Al dejar que se reproduzcan sólo aquellas que presentan patrones interrumpidos de venación, provocó que en cada generación aumentaran las frecuencias de genes que incrementaron la facilidad con que aparece la característica que le interesaba. A través de las generaciones se hizo más fácil la producción de venas interrumpidas.

A diferencia de lo que Lamarck postuló, Waddington explica que no es el ambiente el que confiere de inmediato

a una característica la capacidad de ser heredable, más bien, la selección hace que aumente en la población de moscas la frecuencia de genes asociados a la producción de esa característica. Al final del proceso, es tan fácil la producción de venas interrumpidas, que incluso puede prescindirse del estímulo ambiental. El nombre de asimilación genética le viene bien a este proceso, pues son los genes los que retoman el papel que originalmente tenía un factor ambiental en la producción de una característica.

Asimilación genética en la naturaleza

Si bien Waddington expone que este proceso es posible, su experimento no demuestra que pueda ser importante en las poblaciones de organismos en la naturaleza. No obstante, en los últimos años han aparecido numerosas publicaciones que sugieren que la asimilación genética puede ser responsable de la evolución de características que ayudan a los organismos a sobrevivir y ajustarse a su ambiente. Un ejemplo concierne a las serpientes tigre australianas que han colonizado diversas islas circundan-



SANTIAGO CASTILLO ESPARZA

Maestro en Ciencias Aplicadas por la UASLP, donde actualmente estudia el Posgrado en Ciencias Interdisciplinarias y trabaja en su proyecto de tesis que se enfoca a explorar el papel de la plasticidad fenotípica en la evolución.



tes donde abundan presas de mayor tamaño que en su zona de distribución original. Por tanto, a las serpientes que llegan a estas islas les convendría tener cabezas y fauces más grandes. Los estudiosos han encontrado que, en las primeras fases de colonización de una isla, la plasticidad fenotípica es alta: el tamaño que alcanza la cabeza de las serpientes depende del tamaño de las presas con que se alimentaron durante su juventud; en cambio en fases tardías de la colonización, tienen la cabeza grande independientemente de su alimentación (Aubret y Shine, 2009). En este caso, la evolución de una nueva característica pasa por una fase intermedia en que la característica se produce por plasticidad fenotípica, es decir, el tamaño de la cabeza ha evolucionado por asimilación genética.

No es sólo en características morfológicas, como el patrón de las venas en las alas de las moscas o de qué lado crecerá más grande la pinza de un cangrejo, que la asimilación genética puede tener un papel importante. Hay indicios de que la plasticidad fenotípica también es crucial en la evolución de nuevas funciones en algunas proteínas. Las funciones que esta clase de moléculas pueden realizar dependen en gran medida de su estructura tridimensional; no obstante, ésta depende a su vez del ambiente celular en que se encuentra: la estructura y función de una proteína pueden cambiar dependiendo de a qué otras moléculas se unen, es decir, las proteínas exhiben también plasticidad fenotípica.

La plasticidad fenotípica en las proteínas sería un primer paso en la evolución de funciones novedosas (Amitai

et al., 2007). Por ejemplo, PON1 es una enzima presente en nuestra sangre, su función principal es romper un cierto tipo de moléculas. Sin embargo, esto no es lo único que puede hacer gracias a que presenta plasticidad fenotípica. Y es que en presencia de otras moléculas puede llevar a cabo, aunque con menor eficiencia, otras reacciones. A partir de esta información, un grupo de investigadores caracterizó el comportamiento de alrededor de 300 variantes mutacionales de PON1, que además de llevar a cabo su función principal, mostraron un aumento en la eficiencia con que realizaban algunas de las reacciones alternativas de la enzima y descubrieron posibles cambios que podrían ser favorables en ciertos ambientes.

Estos y muchos otros ejemplos señalan la posibilidad de que la variación producida por plasticidad fenotípica podría facilitar los procesos evolutivos mediante asimilación genética. No obstante, la complejidad de los seres vivos y lo tardado que suelen ser los procesos evolutivos en la naturaleza, dificultan develar los pormenores que han hecho viable la vida como la conocemos. **UP**

Referencias bibliográficas:

- Amitai, G., Gupta, R. D. y Tawfik, D. S. (2007). Latent evolutionary potentials under the neutral mutational drift of an enzyme. *HFSP Journal*, 1, pp. 67-78.
- Aubret, F. y Shine, R. (2009). Genetic assimilation and the postcolonization erosion of phenotypic plasticity in island tiger snakes. *Current Biology*, 19, pp. 1932-1936.
- Barchuk, A. R., Cristino, A. S., Kucharski R., Costa, L. F., Simões, Z. L. P. y Maleszka, R. (2007). Molecular determinants of caste differentiation in the highly eusocial honeybee *Apis mellifera*. *BMC Developmental Biology*, 7, p. 70.
- Bieser K. L. y Wibbels T. (2014). Chronology, Magnitude and Duration of Expression of Putative Sex-Determining/Differentiation Genes in a Turtle with Temperature-Dependent Sex Determination. *Sexual Development*, 8, pp. 364-375.
- Lüning, J. (1992). Phenotypic plasticity of *Daphnia pulex* in the presence of invertebrate predators: morphological and life history responses. *Oecologia*, 92, pp. 383-390.