

VOLANDO HACIA LA SUPERVIVENCIA: LA FASCINANTE MIGRACIÓN DE LA MARIPOSA MONARCA

por **ÁNGEL NAVARRO-FERNÁNDEZ, REBECA PERAL-VICENTE, ALBERTO TORRES LOZANO**

4º GRADO DE BIOQUÍMICA, UNIVERSIDAD DE MÁLAGA, BLVR. LOUIS PASTEUR, 31, PUERTO DE LA TORRE, 29010 MÁLAGA.
ESTUDIANTES DE LA ASIGNATURA BIOQUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y SOCIEDAD DE TERCER CURSO DEL GRADO EN BIOQUÍMICA,
CAMPUS DE TEATINOS, UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ANGELNAVFER@UMA.ES, REBECAPERALVICENTE@GMAIL.COM, ALBERTO.TORRES@UMA.ES

Palabras clave: migración, mariposa monarca, brújula solar, hormona juvenil.

Keywords: migration, monarch butterfly, sun compass, juvenile hormone.

Resumen: La mariposa monarca (*Danaus plexippus*) es una especie extendida a nivel mundial, con la particularidad de que sus amplias migraciones entre Estados Unidos y México abarcan miles de kilómetros. Para orientarse y realizar las migraciones con precisión, las mariposas utilizan el sol a modo de brújula. Esta brújula solar se ajusta al movimiento del sol durante el día gracias a un reloj biológico interno situado en las antenas de la mariposa. Mientras que la migración otoñal hacia México se completa en una sola generación, el regreso primaveral a Estados Unidos requiere varias generaciones, proceso en el que las hormonas, especialmente la hormona juvenil (HJ), juegan un papel fundamental. El fenómeno migratorio de las mariposas monarca se enfrenta a peligros derivados de la actividad humana, como la urbanización o el cambio climático. Por lo tanto, comprender los mecanismos ambientales y fisiológicos involucrados en el proceso migratorio es esencial para la conservación de la especie.

Abstract: *The monarch butterfly (Danaus plexippus) is a species with global presence, with the particularity that its extensive migrations between the United States and Mexico cover thousands of kilometres. To orient themselves and execute migrations accurately, butterflies use the sun as a compass. This sun compass adjusts to the sun's movement throughout the day thanks to an internal biological clock located in the butterfly's antennae. While the fall migration to Mexico is completed by a single generation, the spring return to the United States requires multiple generations, a phenomenon strongly influenced by hormones such as the juvenile hormone (JH). The migratory phenomenon of the monarch butterfly confronts dangers arising from human activity, such as urbanisation and climate change. Therefore, understanding the environmental and physiological mechanisms involved in the migratory process is essential for the conservation of the species.*

Brújula solar:

Introducción:

Cada año, antes del invierno, la nueva generación de mariposas monarca inicia una migración que dura de 2 a 3 meses desde el noreste de los Estados Unidos y Canadá hacia al sur, con la intención de buscar un lugar donde pasar el invierno^[1]. Finalmente detienen su migración en los bosques de abetos de las altas montañas volcánicas de México Central^[2]. Los factores que dan comienzo a la migración de otoño son la disminución de las horas de sol, el descenso de las temperaturas y la senescencia de las plantas hospedadoras^[3]. En primavera, con el aumento de las temperaturas estas mariposas inician su viaje de regreso, pero solo llegan hasta el sur de Estados Unidos, donde depositan sus huevos en el algodoncillo (*Asclepias curassavica*), su principal planta hospedadora^[3]. Las siguientes generaciones continúan el viaje hacia el norte, repitiendo este reemplazo generacional hasta alcanzar de nuevo el lugar de partida^[2].

Para llevar a cabo la migración tanto en otoño como en primavera, las mariposas deben poseer alguna forma de orientarse hacia su destino. *Danaus plexippus* utiliza el sol como su herramienta principal para que las guíe hacia este, como si de una brújula se tratase^[3]. Debido a que diferentes generaciones de mariposas siguen el mismo camino que estaban haciendo sus antecesoras, sabemos que esta brújula solar es innata en todas ellas, apuntando a un origen genético^[1]. Existe un cambio en la orientación de vuelo de la mariposa monarca, pasando de viajar hacia el suroeste en la migración de otoño, a viajar hacia el noreste en la migración de primavera (Figura 1A). Esto se debe a la exposición a factores ambientales derivados de haber pasado el invierno, tales como el frío^[3].

La mariposa recibe las señales lumínicas en dos zonas diferentes del ojo: la retina y el borde dorsal, y gracias a ellas puede conocer la posición del sol.

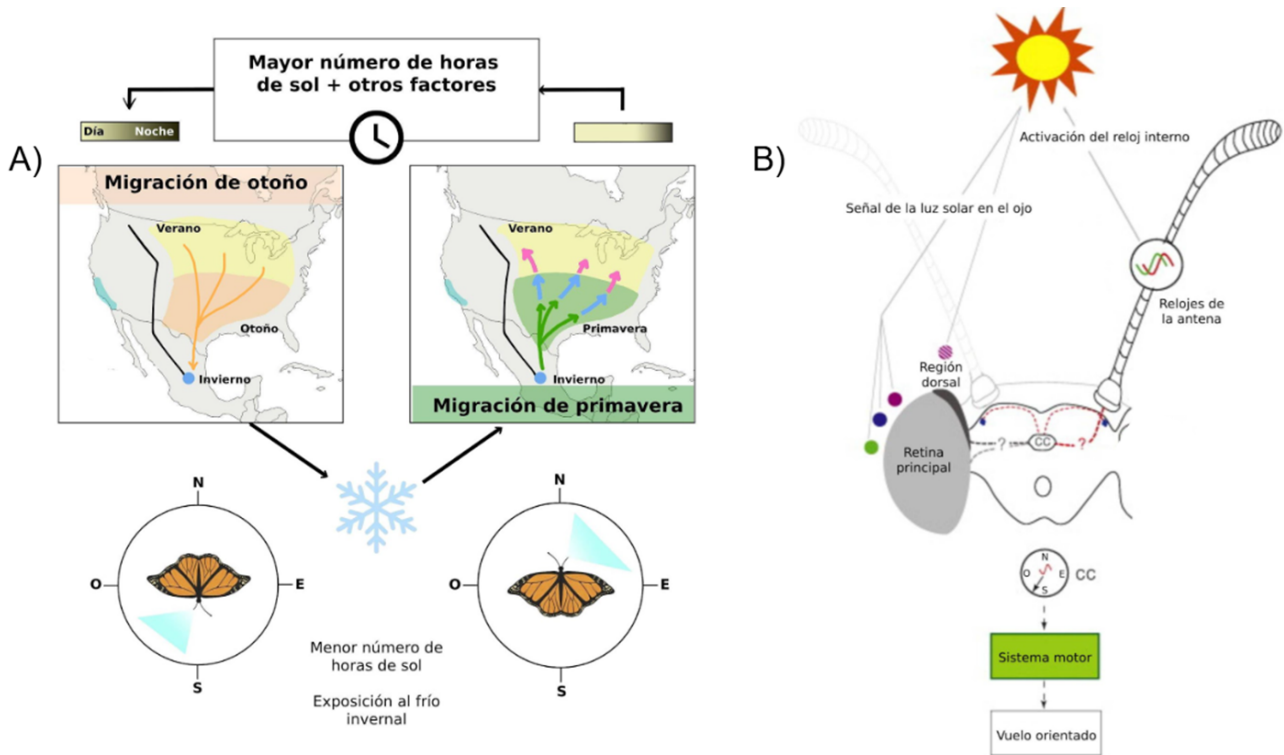


Figura 1. Mecanismos migratorios de *Danaus plexippus*. (A) Ciclo migratorio anual de las mariposas monarca de Estados Unidos. Con el aumento de las horas de sol, una única generación de mariposas (flechas naranjas) viaja hacia el suroeste hasta llegar a México, donde pasan el invierno. Tras la exposición al frío invernal, esta generación cambia su orientación de vuelo e inician el viaje de vuelta a los Estados Unidos (flechas verdes). En este camino polinizan las plantas de algodoncillo y nacen nuevas generaciones de mariposas que seguirán el viaje de vuelta a su hogar (flechas azules y rosas). Reproducido de [2]. (B) Modelo de los componentes involucrados en el mecanismo de vuelo orientado. Los rayos de sol llegan a dos zonas del ojo: la retina y la región dorsal, que le permiten a la mariposa conocer la posición del sol. Por otro lado, la mariposa posee un reloj biológico interno localizado en sus antenas, que se regula en función del número de horas de luz. La información proveniente de los ojos y de las antenas se integra en una zona del cerebro llamada complejo central (CC). El complejo central se comunica con el sistema motor de la mariposa y permite orientar el vuelo en una dirección concreta. Modificado de Reppert, S. M. y otros, 2010.

Cada una mide un parámetro específico de la luz que reciben y envían esa información a una zona del cerebro llamada «complejo central» [2]. Dado que las mariposas necesitan seguir una trayectoria fija y que la posición del sol en el cielo varía a lo largo del día, su brújula interna no puede depender únicamente de la posición de este [1]. En realidad, esta brújula se adapta al movimiento del sol utilizando un reloj interno presente en la mariposa, que se regula constantemente en función del número de horas de luz [3].

El sol como regulador de un reloj biológico:

Tanto las mariposas como muchos otros organismos vivos poseen un reloj interno guiado por la luz solar, con una duración aproximada de un día, que recibe el nombre de «ritmo circadiano». Este reloj biológico es capaz de regular un gran número de

procesos diferentes. Un claro ejemplo en humanos es el proceso del sueño: nuestro cuerpo sabe que es de noche cuando deja de recibir luz del sol, por lo que libera melatonina para inducir el sueño [4]. De hecho, no solo las mariposas utilizan este mecanismo en la migración, también algunos animales como otros insectos, pájaros, tortugas, ranas, roedores o lagartos usan el sol como reloj circadiano con el que orientarse [5].

En el caso de las mariposas, el reloj biológico se encuentra situado en las antenas, que actúan como pequeños receptores de luz solar [2]. Durante el día, cuando el sol brilla, estos receptores absorben la luz y envían señales al interior de las células de la mariposa [1]. La luz induce la disminución de la expresión de ciertos genes, por lo que sus niveles se mantienen bajos durante el día y aumentan progresivamente por la noche, completando el ciclo cuando las antenas vuelven a recibir luz [2]. Este reloj interno permite

que la mariposa integre la información recibida sobre la posición del sol en el cielo y la ajuste según el momento del día^[1]. Así, incluso cuando el sol cambia su posición durante el día, la mariposa puede mantener su dirección de vuelo de manera constante^[3] (Figura 1B).

Regulación hormonal en la migración:

La mariposa monarca destaca por presentar un ciclo migratorio multigeneracional en el que la migración de otoño se completa en tan solo una generación, mientras que en primavera suele necesitar tres generaciones^[3]. A la hora de estudiar el porqué de esta diferencia entre el número de generaciones en ambas migraciones, siendo una misma especie, se ha visto que las hormonas, reguladas en su producción por la luz y la temperatura, juegan un papel muy importante^[6].

Las hormonas son esenciales para el desarrollo y la supervivencia de cualquier organismo, incluyendo a *Danaus plexippus*. HJ desempeña un papel crucial en la migración, reproducción, desarrollo de las larvas y longevidad del adulto^[7]. Durante las épocas cálidas como la primavera, los niveles de HJ en adultos son considerablemente más altos que en los meses fríos. En los meses de invierno es cuando se produce la «diapausa reproductiva», donde la actividad reproductiva se reduce hasta que las condiciones ambientales sean más favorables^[8]. Existe por tanto una relación entre los niveles de HJ y el momento en el que las mariposas inician su migración.

Fisiológicamente, los adultos de *Danaus plexippus* en épocas frías exhiben una envergadura alar mayor y un mayor contenido de lípidos de reserva en comparación con los de épocas cálidas. Además, muestran un menor desarrollo de los órganos reproductivos y mayor longevidad. Se postula que esta disparidad podría asociarse con niveles reducidos de HJ^[7], apuntando a la implicación de esta hormona en la mayor supervivencia de la generación migrante en otoño con respecto a las de primavera.

La octopamina y la tiramina, hormonas similares a la adrenalina en vertebrados, regulan procesos metabólicos como el transporte de moléculas energéticas en el interior del insecto. La conversión de tiramina en octopamina está vinculada a la capacidad de orientación espacial del adulto, siendo crucial en la utilización del sol como referencia. Estas hormonas, junto con la HJ, son fundamentales para la supervivencia y migración de la mariposa monarca^[9].

Impacto humano en la migración:

Debido a que las horas de luz son un factor crucial en la regulación de la migración de las mariposas monarca, la urbanización es un factor que puede poner en peligro este proceso^[10]. El incremento de señales lumínicas durante la noche en zonas que atraviesen las mariposas en su migración, podría romper el ciclo migratorio al desajustar el reloj interno^[10]. Por otro lado, la temperatura también juega un papel importante en la migración^[2]. La exposición al frío es necesaria para el cambio de dirección y que dé lugar a la migración de primavera^[3]. Por tanto, el calentamiento global podría desequilibrar el ciclo haciendo que las mariposas no pudieran volver a sus hogares en el norte^[10].

La distribución espacial de los algodocillos también está muy influenciada por la actividad humana, y en consecuencia puede tener un impacto sobre *Danaus plexippus* y su proceso migratorio. Debido a los efectos causados por el cambio climático, la ubicación de esta planta está variando, situándose cada vez en latitudes mayores en el hemisferio norte^[11]. Por otro lado, dadas las crecientes necesidades en producción de alimento, la implementación del uso de herbicidas ha llevado al cultivo de plantas resistentes a estos productos. Esto genera una competencia directa con los algodocillos silvestres, llevando a una disminución en su población al no ser resistentes a dichos compuestos. Se estima que las poblaciones de plantas hospedadoras se verían limitadas a ciertas regiones cada vez más al norte de los Estados Unidos y, en consecuencia, las mariposas monarca tendrían más dificultades en el retorno durante la primavera. Esto se debe a que las mariposas necesitarían gastar una mayor cantidad de energía para alcanzar los algodocillos, debilitándose y perdiendo la vida antes de tiempo^[11].

Conclusión:

La migración de las mariposas monarca representa un impresionante fenómeno biológico influenciado por una combinación de factores estacionales y hormonales. Sin embargo, la urbanización y el cambio climático amenazan este proceso al alterar los patrones de luz y temperatura que regulan la migración. A su vez, los cambios en la temperatura y el uso de herbicidas afectan al hábitat natural de la planta hospedadora de la mariposa, suponiendo un peligro adicional para la migración y supervivencia de *Danaus plexippus*. Para conservar esta especie, es crucial comprender y abordar estos desafíos mediante una investigación continua sobre los factores ambientales y metabólicos que influyen en su migración. Solo a

través de un esfuerzo concertado para preservar su hábitat y mitigar el impacto ecológico humano, podemos garantizar la supervivencia de las mariposas monarca, manteniendo así su labor esencial como polinizador y su migración única en el mundo.

Referencias

- [1] Reppert, S. M. y otros. Navigational mechanisms of migrating monarch butterflies. *Trends in neurosciences* 33: 399-406, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tins.2010.04.004>
 - [2] Merlin, C. y otros. Monarch butterfly migration moving into the genetic era. *Trends in Genetics* 36: 689-701, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tig.2020.06.011>
 - [3] Reppert, S. M., y de Roode, J. C. Demystifying monarch butterfly migration. *Current Biology* 28: R1009-R1022, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.02.067>
 - [4] Cajochen, C. y otros. Role of melatonin in the regulation of human circadian rhythms and sleep. *Journal of neuroendocrinology* 15: 432-437, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2826.2003.00989.x>
 - [5] Guilford, T. y Taylor, G. K. The sun compass revisited. *Animal behaviour* 97: 135-143, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2014.09.005>
 - [6] Green, D. A. y Kronforst, M. R. Monarch butterflies use an environmentally sensitive, internal timer to control overwintering dynamics. *Molecular ecology* 28: 3642-3655, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.15178>
 - [7] Rahman, M. M. y otros. Local Juvenile Hormone activity regulates gut homeostasis and tumor growth in adult *Drosophila*. *Scientific reports* 7: 11677, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11199-9>
 - [8] Tatar, M. y Yin, C. M. Slow aging during insect reproductive diapause: why butterflies, grasshoppers and flies are like worms. *Experimental gerontology* 36: 723-738, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0531-5565\(00\)00238-2](https://doi.org/10.1016/s0531-5565(00)00238-2)
 - [9] Doyle, T. y otros. Genome-wide transcriptomic changes reveal the genetic pathways involved in insect migration. *Molecular Ecology* 31: 4332-4350, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.16588>
 - [10] Guerra, P. A. The monarch butterfly as a model for understanding the role of environmental sensory cues in long-distance migratory phenomena. *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 14: 600737, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2020.600737>
 - [11] Malcolm, S. B. Anthropogenic impacts on mortality and population viability of the monarch butterfly. *Annual Review of Entomology* 63: 277-302, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043241>
-
-