The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Una mosca puede perder un olor y aun así regresar. En una pluma virtual, la ayudó una dirección recordada

Moscas de la fruta sujetas regresaron repetidamente a una frontera de olor después de caminar por aire limpio. La conducta, la modelización y las perturbaciones neurales respaldan una memoria compacta de la dirección, no un mapa completo. El resultado procede de un ensayo controlado de realidad virtual y todavía no demuestra la misma estrategia en vuelo natural libre.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo, Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila*, Andrew F. Siliciano, Sun Minni, Chad Morton, Charles K. Dowell, Noelle B. Eghbali, Silas E. Busch, Juliana Y. Rhee, L. F. Abbott and Vanessa Ruta, Nature (2026) · DOI: 10.1038/s41586-026-10827-7

Una mosca puede perder un olor y aun así girar para volver hacia él

La mosca había dejado atrás el olor.

Siguió caminando por aire limpio, a veces durante decenas de segundos y cientos de milímetros virtuales. Después giró hacia la frontera que había cruzado y volvió a encontrar el olor. En ese momento, el propio olor no podía indicarle el camino de regreso.

Esa es la observación central de un nuevo estudio de Nature sobre la navegación de la mosca de la fruta. Los investigadores sostienen que las moscas utilizaron un recuerdo compacto de la dirección: no un mapa de toda la pluma de olor ni un recuerdo de la distancia recorrida, sino un rumbo memorizado hacia una frontera que ya no podían detectar.

El resultado llama la atención porque muestra lo poca información almacenada que puede bastar. También es fácil exagerarlo. Estas moscas no volaban libremente por un paisaje natural. Caminaban sujetas sobre una bola sostenida por aire dentro de un mundo virtual estrechamente controlado. El estudio respalda una estrategia basada en vectores dentro de ese aparato; no demuestra que las moscas construyan mapas mentales, no explica todas las formas en que los animales siguen olores ni identifica las células donde se almacena físicamente un recuerdo.

El corredor invisible lo creó el software

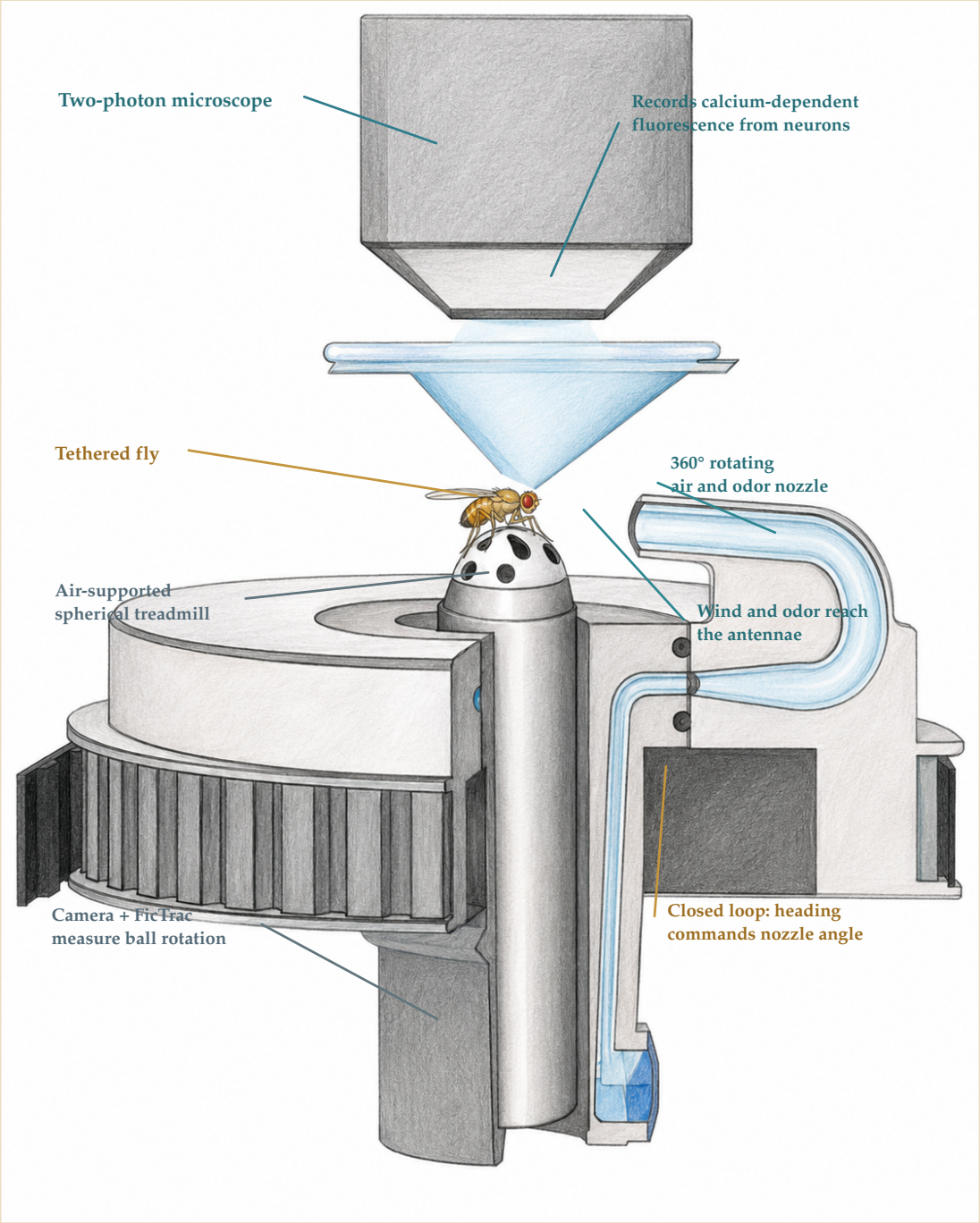
Una pluma de olor es la región móvil de olor transportada por el aire. En el exterior, una pluma se curva, se fragmenta y vuelve a unirse a medida que cambia el viento. Eso dificulta saber con exactitud qué olió un animal en cada momento.

Los investigadores hicieron controlable el problema mediante **realidad virtual en bucle cerrado**. El cuerpo de la mosca permanecía sujeto sobre una bola ligera que flotaba sobre aire. Mientras la mosca caminaba, una cámara medía la rotación de la bola unas 60 veces por segundo. El software traducía esa rotación en una posición y orientación virtuales bidimensionales.

Esa orientación controlaba una boquilla motorizada capaz de girar 360 grados. Cuando la mosca cambiaba su orientación virtual, la boquilla se movía a su alrededor para mantener el viento alineado con una dirección estable dentro del mundo virtual de la mosca. Al mismo tiempo, controladores de flujo másico modificaban la cantidad de aire limpio u olor a vinagre de sidra de manzana que alcanzaba las antenas según la posición virtual del animal. Cruzar una frontera definida por software encendía o apagaba el olor, creando un corredor ficticio de 50 milímetros de ancho y un metro de largo aunque la mosca nunca abandonara la bola.

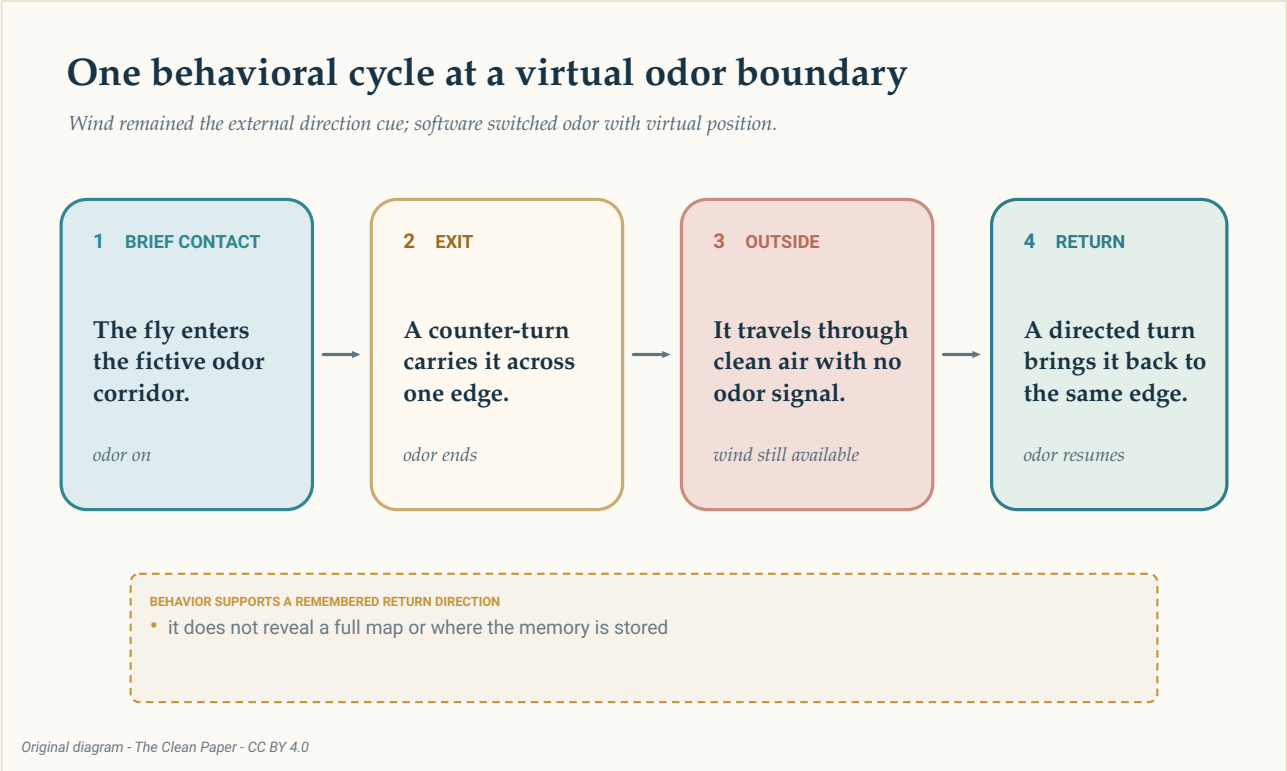
El aparato produjo un registro sincronizado de la posición virtual, la orientación, el estado del olor y los controles de flujo de aire de la mosca en cada instante. A partir de ese registro, los investigadores reconstruyeron trayectorias, marcaron cada entrada y salida y midieron lo directo que era el regreso. El viento proporcionaba la referencia direccional externa; el propio movimiento de la mosca deter-

minaba cuándo encontraba cualquiera de los lados de la frontera virtual del olor.



La mosca permanecía sujeta sobre una bola sostenida por aire. Una cámara y FicTrac convertían la rotación de la bola en movimiento y orientación virtuales; el software hacía después girar la boquilla de aire y olor y activaba el olor según la posición virtual. Durante ensayos independientes de imagen neuronal, el microscopio de dos fotones situado sobre la mosca registraba fluorescencia dependiente de calcio en neuronas EPG o FC2, lo que permitía alinear la actividad neural con la conducta. El microscopio no era necesario en todos los ensayos conductuales.

The Clean Paper CC BY 4.0



En el ensayo controlado, una mosca entró brevemente en el corredor virtual de olor, lo abandonó, atravesó aire sin olor y realizó un regreso dirigido. La conducta respalda la existencia de una dirección de retorno recordada; no revela dónde se almacena esa información.

The Clean Paper CC BY 4.0

En el experimento principal del **corredor vertical**, **40 moscas** entraron repetidamente en el olor, realizaron un contragiro para salir y regresaron al mismo borde. «Vertical» es el nombre que utiliza el artículo para la geometría de 0 grados: el eje largo del corredor estaba paralelo a la dirección contra el viento. No significa que el aparato estuviera colocado en vertical.

Los autores llaman a este patrón **seguimiento del borde**. Un **episodio** es un periodo continuo entre cruces de la frontera: un episodio interior va desde la entrada hasta la salida y uno exterior, desde la salida hasta que la mosca regresa. En 755 episodios interiores, una visita duró de media 4,9 segundos. Durante los retornos, la distancia media a la frontera fue de 10,4 milímetros. Menos del 4% de 793 episodios cruzaron por completo hasta el borde opuesto del corredor.

Estas dos últimas cifras describen episodios, no cientos de moscas independientes. La distinción importa porque un mismo animal puede aportar muchos episodios.

Los regresos no eran solo un reflejo fijo contra el viento

Varios experimentos pusieron a prueba explicaciones más sencillas.

Los investigadores cambiaron primero lo que sucedía **a lo largo** del corredor mientras una mosca caminaba contra el viento. El olor podía hacerse más intenso hacia la fuente virtual, permanecer

constante o debilitarse. Las moscas produjeron trayectorias parecidas en los tres casos. Por tanto, una regla sencilla como «seguir avanzando hacia donde aumenta el olor» no puede explicar el seguimiento del borde dentro de este aparato.

Después suavizaron el borde **lateral** del corredor hasta convertirlo en un perfil gaussiano, donde la concentración cambiaba gradualmente en lugar de encenderse o apagarse de golpe. Las moscas se concentraron cerca del flanco donde la concentración cambiaba con mayor rapidez, no en el centro donde el olor era más intenso. La señal relevante era, por tanto, el cambio lateral que marcaba una frontera efectiva, no un aumento obligatorio hacia la fuente a lo largo del corredor.

Eso no significa que los gradientes de concentración nunca importen en la naturaleza. Significa que, bajo las condiciones probadas, este comportamiento no requería un aumento hacia la fuente.

Los investigadores también cambiaron la orientación del corredor. Grupos independientes siguieron corredores verticales, a 45 grados y a 90 grados, y otro grupo encontró un corredor que saltaba lateralmente después de las salidas. Los tamaños de grupo fueron de 40, 21, 20 y 24 moscas, respectivamente. Sus trayectorias exteriores cambiaron con la geometría. Una regla genérica como «girar siempre contra el viento» no puede explicar esa flexibilidad.

En este montaje, el olor alcanzaba ambas antenas con una diferencia de unos dos milisegundos. Emparejar una activación optogenética bilateral con el viento podía reproducir un patrón parecido al seguimiento del borde. La **optogenética** utiliza proteínas sensibles a la luz para modificar células seleccionadas. En este caso, el resultado sugiere que una diferencia izquierda-derecha en la llegada del olor no era necesaria para esta conducta. No vuelve irrelevante la comparación bilateral en animales que se desplazan libremente por otras plumas.

Un vector es más pequeño que un mapa

Un **vector** es una dirección junto con una magnitud. La cantidad almacenada útil aquí era principalmente direccional: ¿hacia dónde debía girar la mosca para alcanzar la frontera de la pluma? El estudio no encontró pruebas de que la mosca almacenara una disposición completa de la pluma o su propia posición dentro de ella.

Los autores crearon primero trayectorias artificiales barajando los ingredientes de movimientos reales de las moscas. Extrajeron al azar longitudes de carrera y ángulos de giro observados y los unieron. Algunos de esos caminantes sintéticos acabaron alcanzando de nuevo la frontera del olor, pero se alejaban más y seguían rutas menos directas que las moscas reales. Incluso añadir la tendencia ordinaria de las moscas a girar contra el viento no reprodujo los retornos cortos y dirigidos. Por tanto, la conducta real contenía más información direccional que una remezcla aleatoria de los mismos movimientos.

A continuación, los investigadores construyeron un modelo con dos modos: **alejarse de la frontera** y **regresar a la frontera**. Esos modos no eran etiquetas para cada instante dentro o fuera del olor. Eran reglas alternativas de orientación que podían cambiar mientras la mosca se movía.

Cada cruce de la frontera proporcionaba al modelo una dirección que recordar. Al salir, actualizaba

una dirección utilizada durante el alejamiento. Al entrar, actualizaba una dirección de regreso independiente: en efecto, «cuando encontré la frontera, me movía en esta dirección». Durante un regreso posterior, esa dirección recordada sesgaba el movimiento de la mosca simulada hacia el borde.

Los investigadores ajustaron el modelo a trayectorias de corredores de 0, 45 y 90 grados. En la comparación resumida, 72 moscas reales y 75 simulaciones produjeron estadísticas de trayectoria semejantes. Cuando se eliminó la dirección de regreso aprendida durante la entrada, el seguimiento perdió eficacia en todas las orientaciones del corredor. Esto respalda la utilidad de recordar la dirección de entrada; no demuestra que el cerebro de una mosca ejecute literalmente las ecuaciones del modelo.

> **¿Qué significa «memoria» en este artículo?**
>
> Los investigadores no leyeron directamente una flecha almacenada en el cerebro de una mosca. La «memoria direccional» es una inferencia respaldada por la conducta, un modelo y mediciones neurales. El modelo indica que unas pocas direcciones cambiantes pueden reproducir estadísticas importantes de las trayectorias. No demuestra que la mosca implemente literalmente las ecuaciones ni que un único grupo de neuronas sea el lugar de almacenamiento.

Una experiencia adicional con un segmento de 45 grados orientado en sentido opuesto cambió la conducta posterior de 10 moscas, junto con 29 simulaciones del modelo. Eso hace que la explicación direccional sea más específica que una descripción formulada después de observar los datos, aunque siga siendo una interpretación basada en un modelo.

Una referencia de orientación y un objetivo actual

El estudio midió y perturbó después la actividad del **complejo central** de la mosca, una región cerebral implicada en la navegación.

> **Dos señales con funciones distintas**
>
> EPG y FC2 son los nombres de dos poblaciones neuronales del complejo central. La actividad EPG actúa como una lectura de brújula: sigue la dirección hacia la que mira actualmente la mosca respecto al viento. La actividad FC2 se asocia con la dirección en la que la mosca intenta desplazarse. Un circuito de dirección situado aguas abajo puede comparar la orientación actual con ese objetivo. El estudio prueba ambas poblaciones, pero no demuestra que ninguna de ellas por sí sola almacene toda la memoria.

Las **neuronas EPG** transportan una señal de orientación: su patrón de actividad sigue la dirección hacia la que mira la mosca respecto a una referencia externa. Mediante imagen de calcio, una lectura óptica indirecta de la actividad neural, los investigadores observaron que la fase de actividad EPG seguía la orientación respecto al viento durante el seguimiento del borde. Este análisis utilizó 16

ensayos de 9 moscas.

Para inhibir las neuronas EPG, los investigadores las modificaron para que expresaran **GtACR1**, un canal de aniones activado por luz verde. Un LED permanecía encendido durante todo el ensayo de prueba, activaba ese canal y suprimía las neuronas seleccionadas; la misma iluminación no perjudicó a las moscas de control genético.

Al inhibir de este modo las neuronas EPG, 12 moscas experimentales realizaron retornos dirigidos menos eficaces que 6 moscas de control genético. La conclusión delimitada es que la referencia de orientación transportada por la actividad EPG era necesaria para un seguimiento eficaz del borde bajo las condiciones probadas. No demuestra que las neuronas EPG almacenaran por sí solas la dirección de la frontera.

Las **neuronas FC2** mostraron una relación diferente. La actividad de su población se asociaba con el objetivo de navegación actual y apuntaba hacia la frontera de la pluma antes de los giros del ensayo. Las imágenes se obtuvieron en 6 moscas, y las comparaciones de silenciamiento utilizaron grupos de entre 9 y 14 moscas según el análisis. El silenciamiento perjudicó el seguimiento del borde.

La conducta, la modificación de la geometría de la pluma, un modelo ajustado y dos perturbaciones neurales respaldan partes diferentes de la explicación basada en memoria direccional. En conjunto, apoyan la existencia de una dirección-objetivo compacta en este ensayo controlado, no un mapa completo ni un lugar celular de almacenamiento demostrado.

The Clean Paper CC BY 4.0

Son pruebas convergentes, no una cadena de causalidad fotografiada. La actividad EPG proporcionaba una referencia de orientación necesaria. La actividad FC2 era coherente con una dirección-objetivo y resultaba necesaria para una conducta eficaz. Los experimentos no localizaron un único

«engrama» de memoria ni demostraron que las sinapsis FC2 almacenaran físicamente la dirección.

Como analogía aproximada a escala humana, imagine salir de un estrecho banco de niebla mientras un viento constante sigue indicándole dónde está el norte. Una brújula puede decirle hacia dónde mira, pero regresar a la niebla también exige recordar el rumbo hacia su borde. Comparar la orientación actual con ese rumbo deseado indica hacia dónde girar. Esa es la división del trabajo que aquí se propone para las señales EPG y FC2. Es una analogía explicativa, no una prueba de que los seres humanos utilicen las mismas células o el mismo algoritmo.

La memoria dependía de la acción, no solo del momento del olor

En un experimento de reproducción, las moscas recibieron la misma secuencia temporal de olor que antes, pero el momento dejó de estar conectado con lo que hacían en ese instante. El sesgo direccional aprendido se debilitó a lo largo de los episodios reproducidos. Esto respalda una actualización **operante**, vinculada a la acción: lo importante no era únicamente la exposición pasiva a una secuencia de olor, sino la relación entre el olor y el movimiento de la mosca.

El denominador cambia entre esos análisis. Los paneles de Datos ampliados incluyen 8 o 9 moscas según la comparación; la serie de episodios consecutivos utiliza 8 moscas; los paneles de trayectorias exigen al menos 10 entradas efectivas; y los paneles emparejados del modelo utilizan 21 trayectorias simuladas que también cumplen ese umbral de entrada. No son una única muestra agrupada de ocho.

Una pluma más irregular fue útil, pero seguía siendo virtual

Los investigadores también reprodujeron una pluma registrada previamente y más irregular. La ampliaron cinco veces en el espacio y en el tiempo para que las moscas sujetas pudieran encontrarla con suficiente frecuencia. **Diez de 12 moscas** llegaron a menos de 50 milímetros virtuales de su fuente.

Eso no equivale a diez moscas encontrando una fuente real al aire libre. Es rendimiento dentro de una reproducción controlada de una pluma naturalista.

Para cada tipo de pluma dinámica, el modelo generó 2.000 trayectorias. La comparación de la pluma ampliada analizó 1.850 de esas 2.000 después de exigir una entrada efectiva y excluir trayectorias que comenzaban demasiado cerca de la fuente. La memoria ayudaba más cerca de la fuente, donde encuentros sucesivos conservaban una estructura direccional coherente, y menos en la región más turbulenta situada más lejos, a sotavento.

La matización forma parte del resultado. Una dirección compacta solo puede ayudar cuando el mundo mantiene suficiente coherencia como para que un encuentro anterior diga algo útil sobre el siguiente.

Lo que el estudio no muestra

- **No** muestra que una mosca construya un mapa espacial completo.
- **No** muestra vuelo libre a través de una pluma natural sin modificar.
- **No** establece que toda navegación guiada por olores utilice esta estrategia.
- **No** muestra que las neuronas EPG o FC2 sean el lugar físico exclusivo donde se almacena la memoria.
- **No** convierte el modelo ajustado en el algoritmo biológico literal de la mosca.
- **No** se generaliza directamente a la navegación humana.

El estudio es más sólido allí donde es más específico. El control en bucle cerrado proporcionó a los investigadores acceso preciso a cada encuentro con el olor. Los cambios de geometría, la reproducción, la modelización, la imagen de calcio y el silenciamiento probaron después partes distintas de una misma explicación. Pero las cohortes conductuales, de imagen y de silenciamiento eran independientes; los tamaños de muestra no se determinaron de antemano; la recopilación y el análisis de datos no fueron aleatorizados ni cegados; y menos del 10% de las moscas sujetas fueron excluidas por problemas de aclimatación, respuesta o seguimiento.

Esas limitaciones no borran el fenómeno. Lo delimitan.

En pocas palabras

Moscas de la fruta sujetas que caminaban por un corredor virtual de olor regresaron repetidamente a una frontera después de dejar atrás el olor. Los cambios en la concentración y la geometría del corredor, un modelo ajustado de cambio de estado, la imagen neural y el silenciamiento optogenético respaldan una explicación en la que la mosca utiliza una dirección compacta recordada en lugar de un mapa completo. Las neuronas EPG proporcionaban una referencia de orientación necesaria, mientras que la actividad FC2 era coherente con la dirección-objetivo actual. El resultado queda limitado a un ensayo controlado de marcha; no identifica el lugar celular donde se almacena la memoria ni muestra la misma computación en vuelo natural libre.

Sin rodeos

Lo que muestra el artículo: en un ensayo de bucle cerrado con animales sujetos, las moscas realizaron regresos dirigidos hacia fronteras virtuales de olor que ya no podían percibir. Múltiples controles conductuales, la modelización y las perturbaciones neurales respaldan una estrategia basada en vectores.

Lo que se infiere: que la conducta utiliza una memoria direccional compacta y que la actividad de la población FC2 representa un objetivo de navegación actual. El contenido de la memoria no se leyó directamente.

Lo que no muestra: un mapa mental completo, una estrategia olfativa universal, rendimiento en vuelo libre dentro de una pluma natural, un único lugar de almacenamiento de la memoria ni un equivalente humano.

Limitaciones principales: una especie y un aparato controlado; cohortes de moscas y unidades de análisis distintas entre experimentos; señales indirectas de calcio; pruebas de necesidad que no demuestran suficiencia; y una pluma naturalista reproducida y ampliada.

¿Cuánta confianza debería tener un lector general? Confianza alta en que el fenómeno de regreso dirigido es real dentro de este aparato y en que importan la orientación y la actividad del complejo central relacionada con el objetivo. Confianza moderada en el modelo como explicación compacta. Confianza baja en cualquier afirmación que lo extienda sin cambios al aire libre o lo llame un mapa completo.

Fuentes

Siliciano et al., A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila, Nature (2026)
https://doi.org/10.1038/s41586-026-10827-7

Siliciano et al., data archive for A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila
https://doi.org/10.5281/zenodo.20751812

Ruta Laboratory, Edge-Tracking-Model
https://github.com/rutalaboratory/Edge-Tracking-Model