



Estudio experimental del movimiento individual y la dinámica colectiva de hormigas en confinamiento.

Lautaro Gutiérrez Echenique¹, Naomi Nieves Rocha¹, Caracé Gutiérrez¹

¹Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

E-mail: lautaro.gutierrez@fcien.edu.uy, naomi.nieves@fcien.edu.uy

(Recibido el 5/4/2026, aceptado el 3/6/2026)



Resumen

El estudio de movimientos es una parte importante de la física y de su enseñanza. Es tradicional el análisis de trayectorias de materia inactiva; por ejemplo, objetos que caen o giran, abordados mediante un enfoque principalmente analítico basado en las ecuaciones que describen el movimiento. Sin embargo, es menos común el estudio de materia activa —materia que utiliza energía interna para su movimiento— para el que resulta de difícil implementación el enfoque analítico. Por esto, en el presente trabajo se propone un montaje experimental sencillo que permite el estudio de la dinámica de hormigas en confinamiento. Mediante rastreo de trayectorias y conteo de individuos en distintas configuraciones, se discuten semejanzas y contrastes con modelos clásicos de partículas pasivas. A partir de los resultados experimentales, se observa que el movimiento individual de las hormigas presenta desviaciones significativas respecto del movimiento browniano clásico. No obstante, a nivel colectivo, el sistema exhibe dinámicas compatibles con procesos difusivos: en particular, se observa una relajación hacia el equilibrio cuya escala temporal depende tanto del tamaño de la abertura entre compartimentos como del número de individuos. Se argumenta que un abordaje estadístico complementa y enriquece la enseñanza tradicional de la cinemática, al proveer contextos reales donde el movimiento no responde a una única ecuación sino a distribuciones y tendencias. El trabajo busca mostrar que la materia activa, como las cotidianas hormigas, es un recurso valioso para acercar un modo diferente de pensar el movimiento, más cercano a la física estadística y la complejidad.

Palabras clave: Movimiento browniano, hormigas, difusión.

Abstract

The study of motion is an important part of physics and its teaching. The analysis of trajectories of inactive matter is traditional; for example, objects that fall or rotate, approached through a mainly analytical framework based on the equations that describe motion. However, the study of active matter —matter that uses internal energy for its motion— is less common, for which the analytical approach is difficult to implement. For this reason, in this work a simple experimental setup is proposed that allows the study of the dynamics of ants under confinement. Through trajectory tracking and counting of individuals in different configurations, similarities and contrasts with classical models of passive particles are discussed. From the experimental results, it is observed that the individual motion of ants presents significant deviations from classical Brownian motion. Nevertheless, at the collective level, the system exhibits dynamics compatible with diffusive processes: in particular, a relaxation towards equilibrium is observed whose time scale depends both on the size of the opening between compartments and on the number of individuals. We argue that a statistical approach complements and enriches the traditional teaching of kinematics, by providing real contexts where motion does not respond to a single equation but to distributions and trends. This work aims to demonstrate that active matter, such as ants in everyday settings, is a valuable resource for approaching a different way of thinking about motion, more closely aligned with statistical physics and complexity.

Keywords: Brownian motion, ants, diffusion.

1. Introducción

El estudio del movimiento constituye un pilar fundamental de la física y su enseñanza. Tradicionalmente, este análisis se ha centrado en trayectorias de materia inactiva, donde el enfoque es principalmente analítico y basado en ecuaciones cinemáticas clásicas. Sin embargo, resulta menos común el estudio de la materia activa, compuesta por agentes que consumen energía interna para sostener su desplazamiento. La descripción física de estos sistemas, situados en el marco de la física fuera del equilibrio, requiere modelos que consideren la autopropulsión y las fluctuaciones estocásticas, como se observa en la hidrodinámica de la materia blanda [1] y en los marcos teóricos de autoorganización y dinámica browniana activa [2, 3].

Las hormigas constituyen un sistema experimental especialmente interesante para explorar estas ideas. Gran parte de la literatura se ha centrado en contextos ecológicos específicos —como el forrajeo, la formación de senderos o la selección de rutas— en los que las feromonas y las interacciones sociales desempeñan un papel dominante [4, 5, 6] y donde las reglas de movimiento individual desencadenan efectos colectivos no lineales [7]. No obstante, desde una perspectiva física, los individuos también pueden modelarse como agentes activos sometidos a ruido interno y a interacciones con el entorno, planteando una analogía entre el comportamiento de estos insectos y la dinámica molecular [8]. En ausencia de señales externas dominantes, su movimiento puede analizarse en términos puramente cinemáticos y estadísticos [9].

En este contexto, diversos trabajos han investigado la navegación individual de hormigas en entornos simples o desconocidos. En particular, estudios experimentales han mostrado que, a escalas apropiadas, el desplazamiento de ciertas especies puede aproximarse mediante modelos difusivos. Charoonratana y colaboradores, al analizar la navegación de la hormiga *Oecophylla smaragdina* en un ambiente simple y no familiar, concluyeron que su movimiento puede describirse adecuadamente mediante un proceso browniano [10].

A pesar de eso, el carácter estrictamente browniano del movimiento en organismos vivos sigue siendo una cuestión abierta. Las trayectorias reales suelen presentar correlaciones temporales, variabilidad interindividual y efectos de confinamiento que pueden producir desviaciones respecto del modelo ideal. En particular, la presencia de fronteras modifica la dinámica mediante colisiones, cambios de orientación y acumulación en paredes, fenómenos ampliamente estudiados en sistemas de materia activa [1, 3, 10]. Por

este motivo, experimentos en arenas controladas resultan especialmente útiles para evaluar en qué medida una descripción browniana es válida.

Diferentes modelos teóricos han sido propuestos para describir el movimiento de hormigas, incluyendo partículas brownianas activas [2, 3], caminatas aleatorias correlacionadas [11] y caminatas aleatorias reforzadas asociadas a la formación de senderos [12]. Sin embargo, el modelo browniano clásico constituye una primera aproximación particularmente útil [10] tanto por su simplicidad conceptual como por su capacidad para capturar propiedades estadísticas macroscópicas del sistema.

En este trabajo investigamos experimentalmente la dinámica de hormigas recolectadas en estado salvaje dentro de arenas diseñadas para controlar la geometría del sistema y minimizar estímulos externos específicos. A diferencia de estudios centrados en colonias establecidas, aquí se analizan individuos aislados de su contexto ecológico, lo que permite aproximarse a su locomoción intrínseca como agentes activos autónomos. El dispositivo experimental desarrollado permite estudiar tanto las trayectorias individuales como la redistribución colectiva de los individuos entre distintas regiones del espacio.

Nuestra hipótesis inicial es que, en ausencia de señales externas dominantes, el movimiento de las hormigas en este entorno puede describirse aproximadamente como un proceso browniano. Bajo esta hipótesis, el sistema debería exhibir difusión espacial y relajación hacia un estado estacionario análogo al observado en sistemas de partículas pasivas entre recipientes conectados. No obstante, debido a la naturaleza activa de los organismos, es esperable que surjan desviaciones respecto de este modelo ideal, particularmente a escalas temporales cortas o en presencia de confinamiento.

El objetivo de este trabajo es evaluar experimentalmente la validez de esta hipótesis y caracterizar las diferencias entre la dinámica observada y la predicha por un modelo puramente browniano. En particular, analizamos si la complejidad microscópica del movimiento individual impide una descripción difusiva, o si, por el contrario, el comportamiento colectivo puede aproximarse mediante leyes estadísticas simples.

Más allá de su interés conceptual para la física de sistemas fuera del equilibrio, el sistema experimental presentado es simple, reproducible y de bajo costo, lo que lo convierte en una plataforma accesible para estudiar materia activa biológica en condiciones controladas. Los resultados permiten evaluar hasta qué punto el movimiento de organismos vivos puede

describirse mediante modelos estocásticos y aportan evidencia sobre el papel de la autopropulsión y el confinamiento en la emergencia de dinámicas colectivas.

2. Fundamento teórico

En concordancia con las dos escalas en que se desarrolló el trabajo experimental, el fundamento teórico se estructura en dos subsecciones: la primera asociada a la dinámica individual y la segunda asociada a la dinámica colectiva.

2.1. Movimiento browniano

El *movimiento browniano* es el movimiento aleatorio de partículas pequeñas suspendidas en un fluido. Fue observado por el botánico Robert Brown en 1827, que vio partículas de polen moverse erráticamente sobre el agua bajo su microscopio (ver figura 1), pero aunque sabía que no se trataba de partículas vivas, no supo explicar su origen [13]. La explicación física de este fenómeno la brindó Einstein en 1905 [14]. Concluyó que este movimiento se debe a que una partícula sólida está sometida a múltiples choques por el movimiento de las moléculas del fluido, lo que resulta en una fuerza neta. Debido a su tamaño y masa reducidos, los impactos individuales, aunque son aleatorios, producen fluctuaciones apreciables en su posición, de modo que el desplazamiento resultante es visible en un microscopio [15].

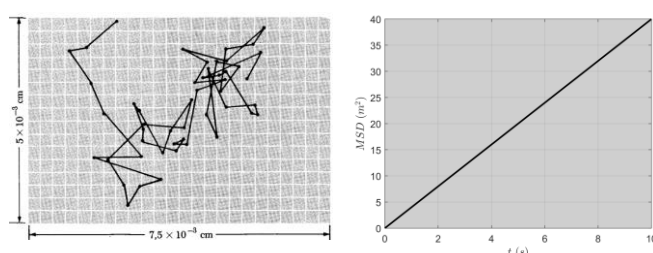


Figura 1. Movimiento browniano. [Izquierda] Movimiento browniano de una partícula sólida, de 10^{-4} cm de diámetro, suspendida en agua y observada a través de un microscopio, en intervalos de 30 segundos. [Datos de J. Perin, Atoms, p. 35, en [15]]. [Derecha] Desplazamiento cuadrático medio (MSD) de una partícula con un movimiento aleatorio.

Para un movimiento aleatorio en dos dimensiones, Einstein determinó que el desplazamiento cuadrático medio, magnitud que permite cuantificar la extensión espacial de un movimiento aleatorio, se relaciona con el tiempo de manera lineal (ver figura 1), esto es

$$\langle \Delta r^2(t) \rangle = 4Dt \quad (\text{Ec. 1})$$

donde D es un coeficiente que depende de las características del medio y la partícula y t es el tiempo [14].

2.1. Difusión de partículas

Si tenemos un recipiente con aire en equilibrio térmico e introducimos una pequeña cantidad de un nuevo gas, el gas comenzará a extenderse por todo el recipiente, pero lo hará lentamente debido a la presencia del aire. Este proceso de expansión se denomina *difusión* [13]. La difusión está controlada principalmente por las moléculas del gas que se desplazan entre sí por las moléculas del aire de fondo. Después de muchas colisiones, las moléculas terminan distribuyéndose de forma más o menos uniforme por todo el recipiente [13]. Desde el punto de vista de la física estadística, este sistema aislado que se encuentra inicialmente en un estado poco probable tenderá con el tiempo a configuraciones más probables, de mayor desorden (salvo pequeñas fluctuaciones), alcanzando finalmente el estado de equilibrio, ya que cada partícula se mueve aleatoriamente [15].

Una representación de un proceso de difusión se muestra en la figura 2, donde N partículas de un gas inician en una mitad, y tras retirar una barrera se expanden en todo el recipiente. El tiempo en el que se alcanzan $\frac{1}{2}N$ partículas en cada lado se denomina tiempo de relajación, τ_r [15].

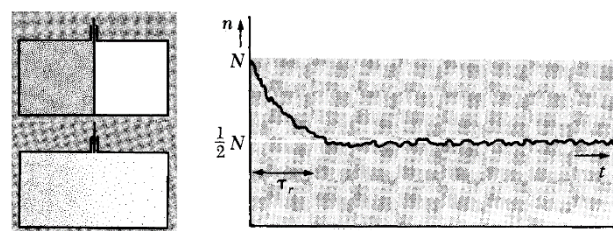


Figura 2. Difusión. [Izquierda] Representación de la difusión de un gas. Cuando se retira repentinamente la pared todas las partículas que estaban concentradas en la mitad izquierda comienzan a difundirse. [Derecha] Gráfica esquemática del número n de partículas en la mitad izquierda de la caja en función del tiempo t , empezando en el instante inmediatamente después de haber retirado la pared. Se indica el tiempo de relajación τ_r [15].

3. Montaje experimental y métodos

En esta sección se describen los dispositivos y procedimientos utilizados para analizar la dinámica de hormigas tanto a nivel individual como colectivo. Para esto, se utilizaron especímenes correspondientes a

hormigas silvestres recolectadas en la zona costera del departamento de Canelones (Uruguay). A partir de una guía de identificación taxonómica [16], se determinó que los individuos pertenecen al género *Camponotus* sp. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) bajo iluminación natural ambiente. Antes de cada realización experimental, utilizando papel secante y alcohol se limpiaron los recintos con el fin de eliminar restos de feromonas.

El registro de los desplazamientos se llevó a cabo mediante una cámara ubicada cenitalmente, grabando en 1080p a 30FPS. Posteriormente, se extrajeron las trayectorias bidimensionales calibrando las dimensiones de la arena y utilizando la herramienta de rastreo automático del software Tracker [17].

3.1. Configuración para el estudio de la dinámica individual

Para el estudio del movimiento individual, se diseñó e implementó un dispositivo experimental, que consiste en un recinto cuadrado de base sólida de $(21,0 \pm 0,5)$ cm de lado, delimitado por un perímetro de agua para asegurar el confinamiento de las hormigas en el área de estudio (ver figura 3). Se registraron trayectorias de hormigas aisladas, $N = 1$, y de una hormiga en el mismo recinto en interacción con otra, $N = 2$.

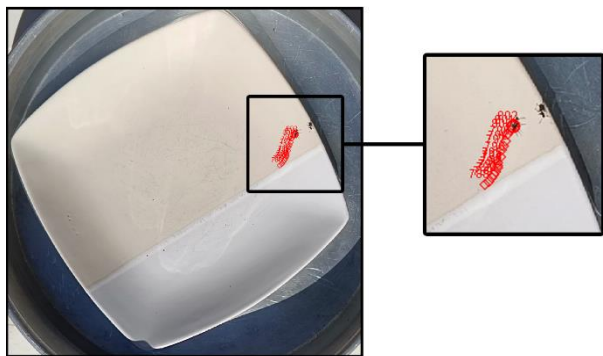


Figura 3. Montaje experimental correspondiente al estudio de la dinámica individual de una hormiga aislada y en interacción con otra. En rojo, la trayectoria registrada mediante videoanálisis.

3.2. Configuración para el estudio de la dinámica colectiva

Para el estudio del comportamiento colectivo se montó un dispositivo análogo al de la figura 2. Se utilizó un recinto de $(40,0 \pm 0,5)$ cm $\times$ $(30,0 \pm 0,5)$ cm de base y $(1,0 \pm 0,1)$ cm de altura, lo que permite considerar que se trata de un movimiento en dos

dimensiones. Se inició con el total de hormigas N en una mitad del compartimento, limitadas por una barrera (ver figura 4).

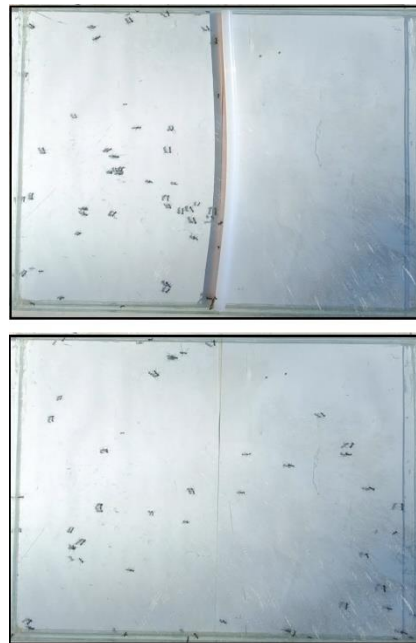


Figura 4. Montaje experimental, en analogía con el descrito en la figura 2, para el estudio de las dinámicas colectivas.

Por un lado, se realizaron registros eliminando la barrera completamente para $N = 21$ y para $N = 50$; por otro lado, se registró dejando una abertura de $l = (5,0 \pm 0,3)$ cm entre una mitad y otra para $N = 28$ y para $N = 53$. A partir de los registros, se contabilizó el número de individuos en un compartimento en función del tiempo. Asimismo, se analizó el movimiento individual de una hormiga elegida arbitrariamente en dinámica colectiva, para contrastar con las estudiadas con el primer montaje.

3.3. Métodos

Para caracterizar la dinámica estocástica a nivel individual, el promedio sobre múltiples partículas simultáneas (promedio de ensamble) empleado en los modelos clásicos de difusión no es directamente aplicable. En su lugar, la literatura científica contemporánea demuestra que, al estudiar sistemas biológicos de materia activa, el cálculo del Desplazamiento Cuadrático Medio Temporal resulta ser el enfoque necesario y válido para analizar estas trayectorias [18].

En este trabajo, dicho cálculo se realizó implementando el método de ventanas de tiempo deslizantes sobre la trayectoria completa registrada para cada individuo. Este enfoque empírico, propio de

las técnicas de seguimiento de partículas individuales, permite cuantificar la dispersión intrínseca del animal a distintas escalas de tiempo y contrastarla adecuadamente con los regímenes teóricos difusivos. Cabe aclarar que, en lo sucesivo, toda mención al desplazamiento cuadrático medio (o simplemente MSD) en este estudio hace referencia estricta a este cálculo temporal.

En la práctica, para cada separación fija entre posiciones de una misma trayectoria, se consideraron todos los pares de puntos disponibles separados por dicho intervalo, se calculó el cuadrado de la distancia entre ellos y luego se promedió sobre todos los instantes iniciales posibles. De este modo, el desplazamiento cuadrático medio queda estimado para cada escala temporal a partir de un barrido sistemático de toda la trayectoria.

4. Resultados

En esta sección se exponen los resultados del análisis cinemático y estadístico de las trayectorias de las hormigas. Para abordar la complejidad del sistema, el análisis se estructura en dos escalas complementarias: en primer lugar, se caracteriza la dinámica individual para contrastar su comportamiento con el movimiento browniano clásico; y, en segundo lugar, se analiza la dinámica colectiva para evaluar la emergencia de fenómenos de transporte análogos a la difusión macroscópica y la relajación hacia el equilibrio.

4.1. Dinámica individual: ¿hormigas brownianas?

En la figura 5 se presentan los resultados para las dinámicas individuales. La fila **a** corresponde a una hormiga aislada ($N = 1$) desplazándose bajo las condiciones del montaje de la fig. 3, mientras que la fila **b** muestra el caso de una hormiga en el mismo recinto, pero en interacción con otra ($N = 2$). La fila **c** presenta el movimiento de una hormiga perteneciente a un conjunto de $N = 50$ individuos, en el montaje de la fig. 4. En cada caso se muestran la trayectoria dentro del recinto, el histograma de posiciones y el desplazamiento cuadrático medio, organizados respectivamente en las columnas **1**, **2** y **3**. Como se evidencia en las columnas 1 y 2 de la figura 5, las hormigas exhiben una marcada tendencia a desplazarse siguiendo los bordes del recinto y a permanecer estáticas en un mismo punto durante intervalos de tiempos prolongados. Estas fluctuaciones abruptas en la dinámica del movimiento son consistentes con la literatura ecológica, donde se ha documentado que los individuos alternan entre fases de desplazamiento lineal rápido y fases de búsqueda local o inactividad temporal [19]. En nuestro montaje, al

tratarse de un entorno confinado y sin estímulos externos dominantes, esta alternancia biológica actúa —junto con las colisiones— como fuente de ruido estocástico predominante. Además, la preferencia por recorrer el perímetro del recinto es consistente con los resultados de Charoonratana y colaboradores [10], quienes modelaron la navegación de hormigas en entornos confinados y desconocidos, demostrando que la interacción con los límites físicos del espacio domina la trayectoria, reduciendo la probabilidad de exploración en el interior de la arena.

El análisis del desplazamiento cuadrático medio (MSD), presentado en la columna 3 de la fig. 5, revela que la dinámica en los tres casos estudiados difiere significativamente del movimiento browniano clásico, dado que no se observa una dependencia estrictamente lineal con el tiempo en todo el intervalo temporal. Esta no linealidad general es una característica inherente de los sistemas de materia activa y las partículas brownianas activas [1, 3]. A diferencia del movimiento browniano pasivo impulsado por fluctuaciones térmicas, los organismos vivos transforman energía interna para autopropulsarse, lo que se traduce en trayectorias con memoria direccional antes de alcanzar un posible régimen puramente difusivo. En este contexto, el MSD revela una fuerte dependencia de la dinámica individual respecto a la densidad poblacional.

La figura 5 muestra que para una hormiga aislada ($N = 1$, panel **a**₃) y en condiciones de mínima interacción ($N = 2$, panel **b**₃), el MSD exhibe marcadas oscilaciones a grandes escalas de tiempo. Estas fluctuaciones macroscópicas son características de trayectorias individuales en recintos cerrados, reflejando el confinamiento espacial: el individuo agota la longitud característica del área experimental y altera drásticamente su direccionalidad al interactuar balísticamente (mediante un movimiento persistente en línea recta) con los límites físicos del montaje. Por el contrario, cuando el individuo se encuentra inmerso en la dinámica colectiva de alta densidad ($N = 50$, panel **c**₃), las grandes oscilaciones desaparecen drásticamente, dando lugar a una curva de crecimiento suave y sostenido. Resulta interesante destacar que, para este caso, la gráfica exhibe un régimen de crecimiento aproximadamente lineal a escalas de tiempo cortas, específicamente hasta $t \approx 30$ s. Este fenómeno sugiere que el aumento en la frecuencia de interacciones interindividuales (colisiones e interacciones evasivas) actúa como una fuente de ruido estocástico análoga a la agitación térmica.

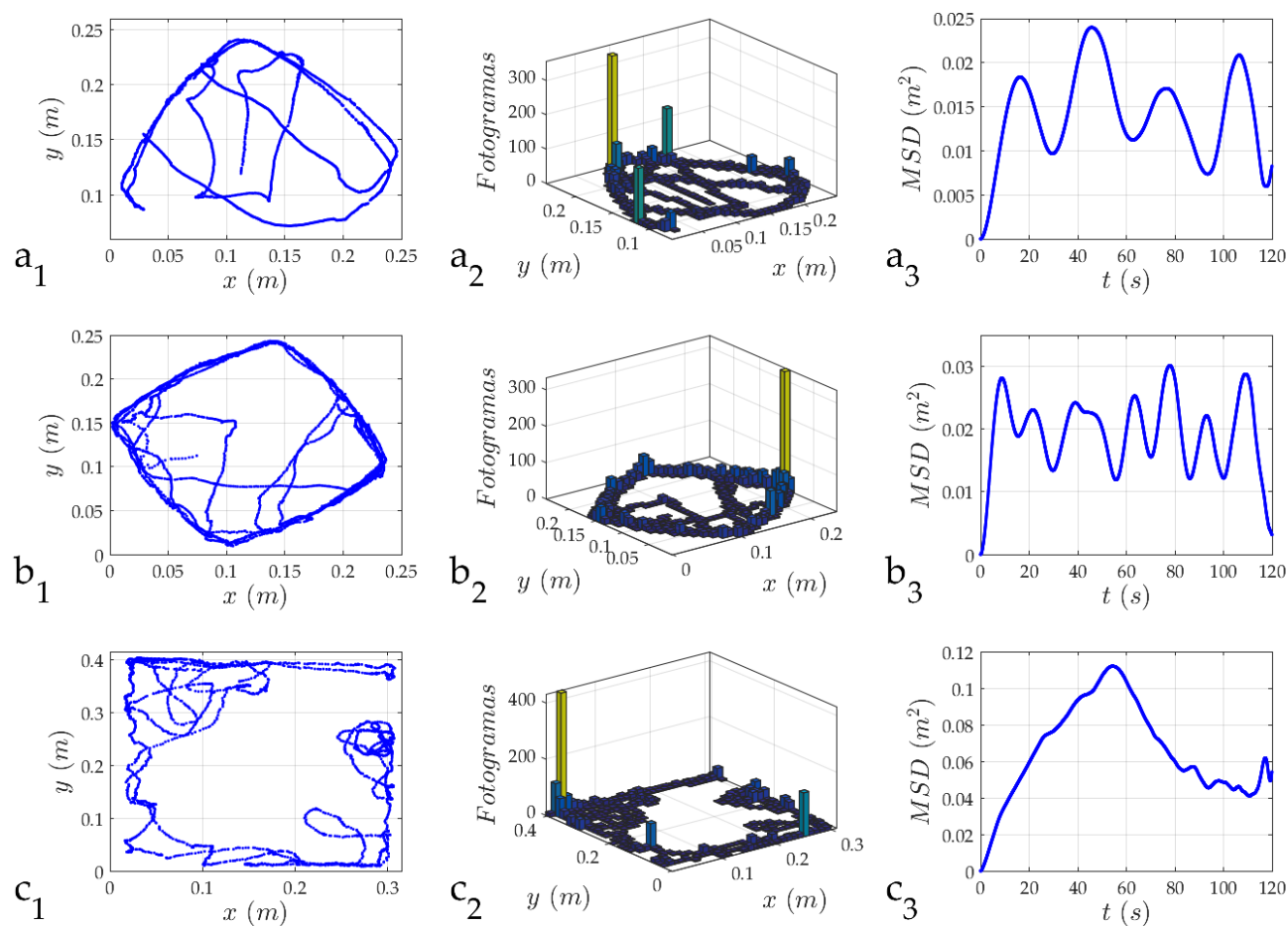


Figura 5. Trayectorias individuales de tres hormigas en diferentes contextos. La fila **a** corresponde a una hormiga aislada ($N = 1$) moviéndose en las condiciones del montaje de la fig. 3 y la fila **b** a una hormiga moviéndose en el mismo recinto en interacción con otra ($N = 2$). La fila **c** refiere a una hormiga dentro de un conjunto de $N = 50$, en el montaje de la fig. 4. Para cada caso se representa la trayectoria en el recinto (columna 1), el histograma de posiciones (columna 2) y el desplazamiento cuadrático medio (columna 3).

Las constantes interacciones interrumpen los recorridos prolongados de la autopropulsión, forzando una rápida pérdida de la memoria direccional e induciendo un régimen transitorio de tipo browniano a tiempos cortos. En este estado de alta densidad, las restricciones impuestas por la multitud dominan sobre el confinamiento de las paredes, homogeneizando la dinámica espacial del individuo a tiempos largos.

Cabe destacar que el cálculo del MSD mediante ventanas de tiempo deslizantes asume una hipótesis de estacionariedad que, como sugieren las oscilaciones en los casos de baja densidad, es una aproximación al comportamiento promedio. Estas fluctuaciones son intrínsecas al confinamiento y a la alternancia de regímenes (entre perimetral y central), por lo que el MSD debe interpretarse como una caracterización de la escala de persistencia y no como un proceso estocástico ideal. No obstante, la convergencia hacia curvas suaves

en el caso de $N = 50$ refuerza la validez del método para describir la dinámica colectiva.

4.2. Dinámica colectiva: ¿difusión?

En la fig. 6 se presentan los resultados para las dinámicas colectivas. Se grafican la cantidad de hormigas en una mitad, n , en función del tiempo t en segundos. Se observa que tras un tiempo de relajación, τ_r , el número oscila en torno al equilibrio, en $n = \frac{1}{2}N$. Se obtuvo que, en los casos donde la apertura es de $l = (5,0 \pm 0,3) \text{ cm}$, el tiempo de relajación $\tau_r = 335 \text{ s}$ para la realización con $N = 28$ y $\tau_r = 168 \text{ s}$ para la realización con $N = 53$. Por otro lado, cuando se elimina por completo la barrera, se obtuvo que $\tau_r = 15,0 \text{ s}$ con $N = 21$ y $\tau_r = 9,5 \text{ s}$ con $N = 50$. Se tomó τ_r como el tiempo en que se alcanza por primera vez $n = \frac{1}{2}N$.

Respecto a la dinámica colectiva, los resultados revelan una dependencia de τ_r con el grado de confinamiento (relacionado con la geometría y la densidad de individuos) impuesto. Al transicionar de una abertura de $l = (5,0 \pm 0,3) \text{ cm}$ a la eliminación total de la barrera, el sistema experimenta una reducción drástica en τ_r , pasando de escalas temporales del orden de cientos de segundos a apenas unos pocos segundos. A nivel macroscópico, este comportamiento presenta una profunda analogía con los procesos termodinámicos de difusión y expansión libre de un gas ideal, donde la tasa de flujo de partículas hacia el equilibrio estadístico (con fluctuaciones en torno a $\frac{1}{2}N$) está modulada directamente por la sección transversal de la abertura disponible [13]. Esta observación empírica es consistente con el enfoque de auto-organización propuesto por Detrain y Deneubourg [8], quienes muestran que estructuras colectivas pueden emerger a partir de interacciones locales entre individuos, sin la intervención de un control centralizado.

Sin embargo, la naturaleza intrínseca del sistema exige interpretar este flujo en términos de la materia activa. De acuerdo con los marcos teóricos establecidos [1, 3], a diferencia de las partículas pasivas, los organismos vivos inyectan energía a nivel local para autopropulsarse, generando lo que se conoce como presión activa. En presencia de la restricción espacial ($5,0 \text{ cm}$), el flujo migratorio de las hormigas se ve fuertemente limitado por un efecto de cuello de botella; en esta región, las interacciones estéricas (exclusión de volumen) y las colisiones entre individuos penalizan el tránsito, elevando el tiempo de relajación. Por el contrario, al suprimir la barrera, la presión activa colectiva facilita una rápida dispersión espacial, permitiendo que la dinámica de relajación del ensamble alcance su estado estacionario en una fracción mínima de tiempo, evidenciando cómo las restricciones del entorno dominan sobre la movilidad individual en sistemas confinados.

Las mediciones sugieren que el tiempo de relajación τ_r guarda una relación inversa tanto con el tamaño de la abertura l como con el número de individuos N . El primer comportamiento es consistente con los modelos de difusión donde el flujo de partículas es proporcional al área de tránsito disponible [13]. Por otro lado, la disminución de τ_r al aumentar N sugiere que la presión activa del sistema juega un rol crucial en la velocidad con la que el conjunto alcanza el equilibrio estadístico. Este fenómeno permite que la autopropulsión y la mayor frecuencia de intentos de paso de las hormigas superen incluso los efectos de exclusión de volumen que, en sistemas pasivos, ralentizarían el tránsito en aperturas estrechas [1, 3].

5. Conclusiones y perspectivas

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, es posible caracterizar de forma detallada las dinámicas individuales y colectivas de las hormigas. En primer lugar, se observó que, aunque el desplazamiento de los individuos aislados presenta una apariencia aleatoria a simple vista, el análisis riguroso de sus trayectorias revela que estas contrastan de forma clara con el movimiento browniano clásico.

Sin embargo, a nivel macroscópico, el comportamiento colectivo de estos organismos muestra una profunda analogía con la difusión térmica de partículas en un gas. Se destaca que, aun cuando el movimiento a escala individual no sea estrictamente browniano, la dinámica del grupo en su conjunto exhibe características estadísticas fundamentales, como la relajación gradual hacia un estado de equilibrio estadístico.

Por otro lado, la sencillez del montaje experimental empleado convierte a este tipo de estudios empíricos en una herramienta sumamente accesible y reproducible, con un gran potencial tanto para el ámbito de la investigación como para la enseñanza. La utilización de un enfoque estadístico para analizar el movimiento de organismos vivos complementa los estudios cinemáticos tradicionales, enfatiza la riqueza de las dinámicas colectivas y funciona como un puente conceptual y práctico entre la Biología y la Física.

Este trabajo de carácter exploratorio deja abiertas interrogantes para futuras investigaciones. Entre las proyecciones más destacadas, nos planteamos estudiar si el movimiento de las hormigas en condiciones de total libertad (sin las restricciones de las paredes del recinto) presentaría características brownianas. Asimismo, resulta fundamental indagar sistemáticamente cómo depende el tiempo de relajación (τ_r) del sistema en función de variables clave, como el número total de individuos (N) y la longitud de la abertura entre compartimentos (l). Además, resulta de gran interés explorar el comportamiento de las hormigas variando parámetros del medio (tales como la temperatura, la rugosidad de la superficie o la iluminación), lo que permitiría comprender mejor la influencia del entorno en su dinámica.

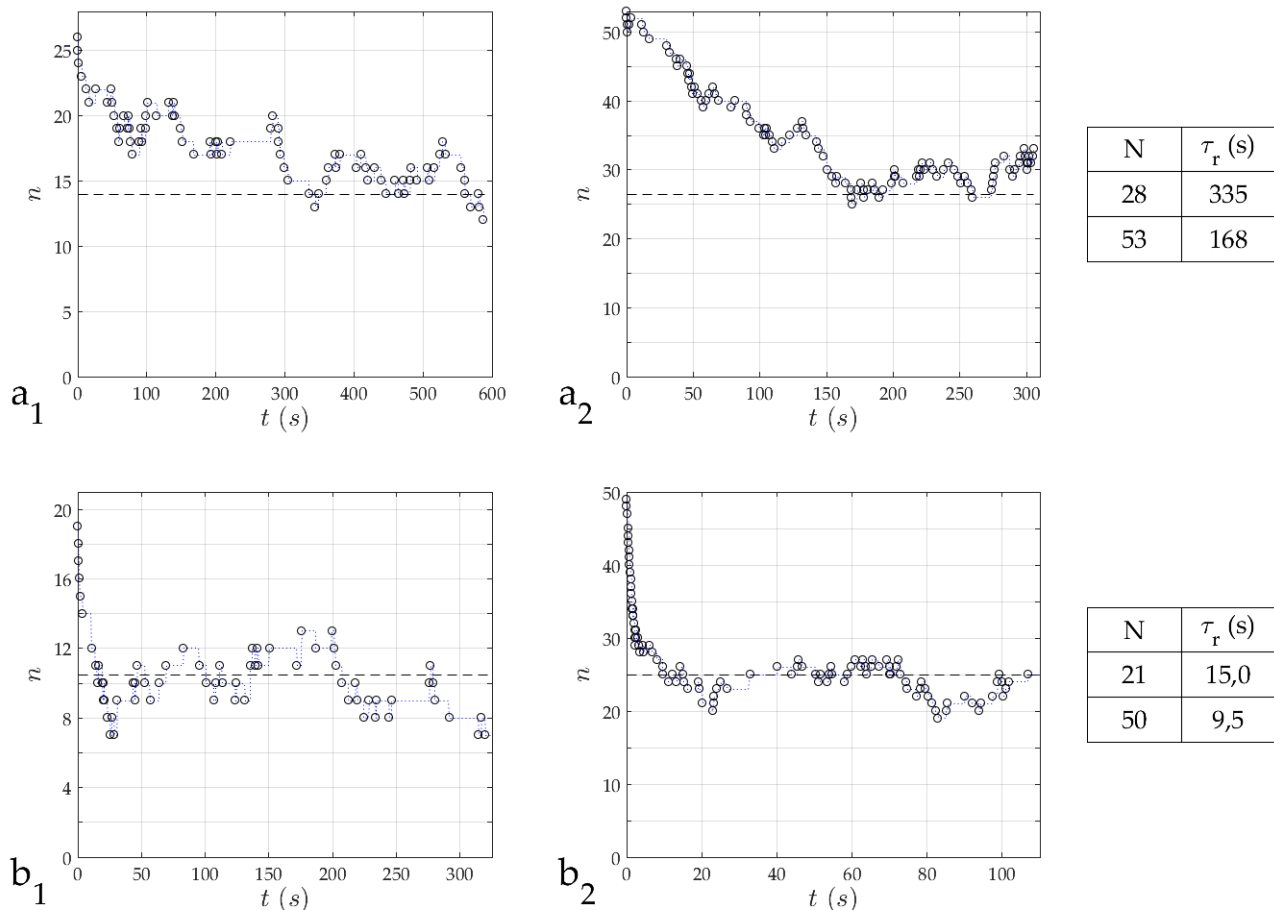


Figura 6. Número de hormigas, n , en un compartimento en función del tiempo para 4 realizaciones diferentes. Se observa que tras un tiempo de relajación, τ_r , el número de hormigas oscila en torno al equilibrio, en $n = \frac{1}{2}N$ (línea cortada). La fila a muestra la difusión al abrir en $t = 0$ s una ranura de $l = (5,0 \pm 0,3)$ cm entre ambos compartimentos con $N = 28$ (panel a₁) y $N = 53$ (panel a₂). La fila b muestra la difusión al eliminar completamente la barrera en $t = 0$ s con $N = 21$ (panel b₁) y $N = 50$ (panel b₂). Las tablas muestran el tiempo de relajación τ_r en función de N .

6. Referencias

- [1] M. C. Marchetti, et al., *Hydrodynamics of soft active matter*, Reviews of Modern Physics (2013).
- [2] W. Ebeling & F. Schweitzer, *Self-Organization, Active Brownian Dynamics, and Biological Applications*. arXiv preprint cond-mat/0211606. (2002).
- [3] P. Romanczuk, et al., *Active Brownian Particles. From Individual to Collective Stochastic Dynamics*, The European Physical Journal Special Topics, 202(1), 1-162. (2012).
- [4] S. Goss, et al., *Self-Organized Shortcuts in the Argentine Ant*, Naturwissenschaften 76(12), 579-581 (1989).
- [5] S. D. Ryan, *A Model for Collective Dynamics in Ant Raids*. Journal of mathematical biology, 72(6), 1579-1606. (2015).
- [6] A. Perna, et al., *Individual rules for trail pattern formation in Argentine ants (Linepithema humile)*. PLoS computational biology, 8(7), e1002592. (2012).
- [7] L. Edelstein-Keshet, et al., *Trail following in ants: individual properties determine population behaviour*. Behavioral Ecology and Sociobiology, 36(2), 119-133. (1995).
- [8] C. Detrain & J. Deneubourg, *Self-organized structures in a superorganism: do ants "behave" like molecules?*. Physics of life Reviews, 3(3), 162-187. (2006).
- [9] S. Thiawatwanikul, et al., *Modeling navigation by weaver ants in an unfamiliar, featureless environment*. Physical Review E, 101(5), 052404. (2020).
- [10] L. Charoonratana, et al. *Modeling the movement of Oecophylla smaragdina on short-length scales in an*

- unfamiliar environment. *Movement Ecology*, 11(1), 64. (2023).
- [11] V. Dodoková, et al., *A stochastic model of ant trail formation and maintenance in static and dynamic environments*. *Swarm Intelligence*, 18(4), 335-371. (2024).
- [12] M. Vela-Pérez, et al., *From individual to collective dynamics in argentine ants (Linepithema humile)*. *Mathematical biosciences*, 262, 56-64. (2015).
- [13] R. P. Feynman, R. B. Leighton, y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1 Addison-Wesley, Reading, MA. (1963).
- [14] A. Einstein, "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen", *Annalen der Physik*, 322, 549-560. (1905).
- [15] F. Reif. *Física estadística* (Berkeley Physics Course). Reverte. ISBN 8429140255. (1993)
- [16] F. B. Baccaro, et al., *Guia para os gêneros de formigas do Brasil*. Editora INPA, Manaus. (2015).
- [17] Brown, D., Hanson, R., & Christian, W. *Tracker Video Analysis and Modeling Tool* (Version 6.1.5) [Computer software]. Open Source Physics. (2024). <https://opensourcephysics.github.io/tracker-website/>
- [18] Metzler, R., Jeon, J. H., Cherstvy, A. G., & Barkai, E. *Anomalous diffusion models and their properties: non-stationarity, non-ergodicity, and ageing at the centenary of single particle tracking*. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(44), 24128-24164. (2014).
- [19] J. F. Traniello, et al., *Search behavior and foraging ecology of the ant Formica schaufussi: colony-level and individual patterns*. *Ethology Ecology & Evolution*, 3(1), 35-47. (1991).

7. Anexo

A continuación se anexa el algoritmo utilizado para analizar datos en el software MATLAB. Se agregaron comentarios explicativos en verde y después del símbolo de porcentaje (%).

```
%Se limpia el entorno de trabajo antes de iniciar el análisis:
close all; clear; clc
%Se cargan los datos experimentales obtenidos de Tracker y se separan las columnas de tiempo y posición:
data = load('DATOSDETRACKER.txt');
t = data(:,1); x = data(:,2); y = data(:,3);
%Se definen las variables necesarias para calcular el MSD:
N = length(t); MSD = zeros(N-1, 1);
%Se calcula el desplazamiento cuadrático medio para distintos intervalos temporales con un bucle:
for tau = 1:N-1
    desplazamiento_cuadratico = 0;
    %Para cada tau, se comparan posiciones separadas por ese intervalo:
    for i = 1:(N - tau)
        dx = x(i + tau) - x(i);
        dy = y(i + tau) - y(i);
        desplazamiento_cuadratico = desplazamiento_cuadratico + dx^2 + dy^2;
    end
    %Se promedia el desplazamiento cuadrático sobre todos los pares disponibles:
    MSD(tau) = desplazamiento_cuadratico / (N - tau);
end
%Se grafica el MSD en función del tiempo de retardo:
figure; plot(t(1:N-1), MSD, 'b.', 'Markersize',6.5)
xlabel('$t \ (s)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
ylabel('$MSD \ (m^2)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
set(gca, 'FontName', 'DejaVu Math TeX Gyre', 'FontSize', 12)
xlim([0,120])
grid on
%Se construye un histograma bidimensional de ocupación espacial:
figure(); h2 = histogram2(x, y, 30,'FaceColor','flat');
set(gca, 'FontName', 'DejaVu Math TeX Gyre', 'FontSize', 12)
xlabel('$x \ (m)$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
ylabel('$y \ (m)$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
zlabel('$Fotogramas$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
%Se grafica la trayectoria completa de la hormiga en el plano:
figure(); plot(x, y, 'b')
xlabel('$x \ (m)$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
ylabel('$y \ (m)$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
set(gca, 'FontName', 'DejaVu Math TeX Gyre', 'FontSize', 12)
grid o
```