

PROPUESTA DE SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN

Modalidad: Desarrollo Tecnológico

Título: Modelación y simulación computacional de trayectorias de hormigas

Resumen

El presente proyecto de semillero propone el desarrollo de una simulación computacional basada en estructuras discretas para modelar el recorrido de hormigas mediante reglas iterativas que representan de forma simplificada su comportamiento biológico y se relacionan con la modelación matemática.

Se usará el lenguaje de programación Python para simular computacionalmente el comportamiento de hormigas para determinar posibles trayectorias y su relación con funciones de optimización, integrando conocimientos de biología, matemáticas y física en un entorno formativo interdisciplinar.

Palabras clave

Modelación matemática, Grafos, Hormigas, Simulación computacional, Visualización

Planteamiento del problema

En el suroccidente colombiano, las hormigas cumplen funciones ecológicas clave, como control biológico de plagas y la regulación de interacciones entre especies, lo cual las convierte en un componente fundamental de diversos ecosistemas y su movimiento influye en su eficiencia ecológica (Benavides Machado, 2020). En particular, en Nariño se han registrado más de 100 especies de hormigas, lo que destaca su alta diversidad y relevancia ecológica en la región (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2012).

El comportamiento colectivo de las hormigas ha sido ampliamente estudiado como un sistema complejo autoorganizado, en el cual logran resolver problemas como la búsqueda de rutas óptimas entre el nido y las fuentes de alimento. Desde el punto de vista computacional y matemático, estos procesos pueden representarse mediante grafos, donde las hormigas se modelan como agentes que recorren nodos conectados. Este enfoque ha sido relacionado con problemas clásicos de optimización, como el problema del vendedor o agente viajero (Traveling Salesman Problem - TSP), ampliamente estudiado en el área de las matemáticas discretas (Zhang, Chen, Zhou, et al., 2025). En este contexto, algoritmos como los de optimización por colonia de hormigas (Ant Colony Optimization – ACO) muestran la construcción de trayectorias óptimas (Dorigo, Maniezzo y Colorni, 1996), (Ma, Sun, He, et al., 2026). Por otro lado, modelos basados en autómatas celulares (Wolfram, 2002), como el juego de la vida de Conway (Gardner, 1970) y La hormiga de Langton (Langton, 1986), demuestran que reglas locales pueden generar comportamientos complejos.

No obstante, aunque estos enfoques abordan el problema desde perspectivas matemáticas y computacionales, persiste una limitada integración con los aspectos biológicos reales del comportamiento de las hormigas, tales como el seguimiento de feromonas, la búsqueda de alimento y el retorno eficiente al nido mediante trayectorias óptimas. Asimismo, en contextos formativos interdisciplinarios, como los semilleros de investigación, esta integración resulta aún más limitada, debido a las diferencias en la formación de los estudiantes en áreas como biología, física y matemáticas.

En este sentido, se identifica la necesidad de desarrollar modelos computacionales accesibles que permitan integrar estos enfoques, combinando la modelación matemática discreta, la simulación y la interpretación biológica del fenómeno, en un entorno formativo que favorezca el aprendizaje interdisciplinar en particular teniendo en cuenta que esta propuesta de semillero incluye estudiantes de los programas de Biología, Física y Licenciatura en matemáticas. Por lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible modelar y simular computacionalmente la trayectoria de hormigas de manera que se integren enfoques biológicos, matemáticos y físicos, en el marco de un proceso formativo interdisciplinar para estudiantes de la Universidad de Nariño?

Justificación

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de comprender la complejidad biológica de las hormigas y su papel como ingenieras del ecosistema, utilizando la simulación computacional como un puente integrador entre la biología, la física y las matemáticas. Por tal motivo, la justificación de la propuesta incluye la necesidad de la modelación y simulación computacional del recorrido que realizan las hormigas tanto desde estos enfoques como desde el interdisciplinar.

Las hormigas constituyen un grupo dominante de invertebrados en ecosistemas tropicales, representando una porción significativa de la biomasa animal (Andersen y Majer, 2002). En el departamento de Nariño, convergen los Andes, la Amazonía y el Pacífico, lo cual le asigna una posición geográfica estratégica y tiene una heterogeneidad ecológica única. En esta región, se han registrado más de 100 especies de hormigas que cumplen funciones críticas como el control biológico de plagas y la regulación de procesos en agroecosistemas cafeteros (Benavides Machado, 2020), (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2012).

Debido a su alta sensibilidad a la transformación del hábitat, las hormigas son modelos efectivos para monitorear cambios en el uso del suelo (Fonte et al., 2023). En este sentido, la simulación computacional permite predecir los efectos de la fragmentación del bosque nublado en regiones como la Reserva Natural La Planada sin intervenir físicamente ecosistemas vulnerables (Bautista-Giraldo et al., 2025), (Bustos y Ulloa-Chacón, 1997).

Es importante destacar que las colonias de hormigas son modelos naturales de autoorganización e inteligencia colectiva. El comportamiento complejo de la colonia emerge de interacciones locales simples, principalmente mediante comunicación química y toma de decisiones descentralizada. Las hormigas utilizan gradientes de feromonas para coordinar el movimiento colectivo y construir rutas eficientes hacia el alimento (Hartman et al., 2024). No obstante, el forrajeo óptimo no depende únicamente de seguir señales químicas; requiere de cierto grado de estocasticidad o aleatoriedad que permite a la colonia adaptarse a cambios ambientales (Shiraishi et al., 2019). Esta combinación entre

exploración aleatoria y seguimiento de señales optimiza la búsqueda de recursos bajo mecanismos de selección similares a los principios de la teoría de la información (Baddeley et al., 2019).

Desde la matemática y la física, este comportamiento puede representarse mediante estructuras discretas y grafos, donde los agentes resuelven problemas de optimización combinatoria como el Problema del vendedor Viajante (Zhang et al., 2025). Algoritmos como la Optimización por Colonia de Hormigas demuestran la construcción de trayectorias óptimas basadas en el rastro de feromonas (Dorigo et al., 1996) y (Ma et al., 2026). Complementariamente, modelos de autómatas celulares (Wolfram, 2002), como el Juego de la Vida de Conway (Gardner, 1970) y la Hormiga de Langton (Langton, 1986), prueban que reglas locales simples generan comportamientos globales complejos.

Es así como, desde la matemática y física, el problema permite analizar trayectorias mediante estructuras discretas y funciones de costo, pero es necesario integrar el comportamiento real de las hormigas siguiendo feromonas, la búsqueda de una fuente de alimento y siguiendo el camino más corto para regresar a su nido, estudiado en la biología.

Dada la limitada integración actual entre los procesos biológicos reales y los modelos computacionales, este proyecto surge como una necesidad formativa. Al unir a estudiantes de Biología, Física y Licenciatura en Matemáticas de la Universidad de Nariño, se promueve un aprendizaje interdisciplinar basado en el pensamiento científico. El uso de Python resulta ideal para este propósito, pues facilita el manejo de grandes volúmenes de datos biológicos, la simulación de sistemas de partículas desde la física y el uso de librerías potentes para el análisis de matrices y grafos desde la matemática. De donde, este proyecto pretende aportar al desarrollo tecnológico y a la formación interdisciplinar, con el fin de integrar el conocimiento interdisciplinar de estudiantes de los programas de Biología, Física y Licenciatura en matemáticas de la Universidad de Nariño, además de destacar en la facultad de ciencias exactas y naturales las aplicaciones que unen varios programas de la facultad.

Marco de Antecedentes/Estado del Arte

El estudio de las hormigas como sistemas complejos ha evolucionado desde la observación naturalista hacia la modelación bio-inspirada. A nivel regional, Bustos y Ulloa-Chacón (1997) son un punto de referencia en el departamento de Nariño al estudiar la diversidad en la Reserva Natural La Planada, demostrando que la estructura de las comunidades de hormigas es un indicador sensible de la sucesión vegetal. Este trabajo es fundamental para nuestra propuesta, pues establece que el movimiento y la diversidad de especies en Nariño no son aleatorios, sino que responden a la conectividad del entorno y esto acerca a la idea del uso de probabilidades.

En el ámbito de los agroecosistemas, la Federación Nacional de Cafeteros (2012) y Benavides Machado (2020) han documentado más de 100 especies en cafetales colombianos, resaltando su rol en el control de plagas. En nuestra región en los últimos años ha aumentado el cultivo del café, por tal motivo investigar y explorar con el movimiento de las hormigas y su comportamiento se destaca a pesar de que estos antecedentes biológicos rara vez se han cruzado con modelos computacionales locales.

A nivel internacional, el estado del arte en modelación ha pasado de reglas fijas a sistemas estocásticos. Shiraishi et al. (2019) demostraron que la aleatoriedad es una ventaja evolutiva. Sus hallazgos indican

que una colonia que sigue feromonas de forma rígida se estanca, mientras que la aleatoriedad permite descubrir nuevas fuentes de alimento. Por su parte, Hartman et al. (2024) han avanzado en la modelación de múltiples fuentes de alimento, utilizando ecuaciones que describen cómo la densidad de hormigas interactúa con la tasa de evaporación química, un concepto que este proyecto pretende simular en Python.

Finalmente, investigaciones recientes en física aplicada y redes neuronales, como las planteadas por Mustafa (2015), sugieren una analogía directa entre los sistemas de colonias de hormigas y el aprendizaje de máquinas, lo que justifica la visión tecnológica de esta propuesta hacia el desarrollo de algoritmos de optimización más eficientes. Este enfoque nos lleva a la necesidad de explorar con estrategias computacionales de vanguardia y novedosas, relacionando simulaciones computacionales discretas y aleatorias con el aprendizaje de máquina, la inteligencia artificial y la optimización (Ma, et al., 2026).

Los antecedentes presentados, nos llevaron a seleccionar el soporte conceptual de este proyecto sobre tres ejes: la etología química, los autómatas celulares y la teoría de grafos y simulaciones complejas. El marco conceptual se presenta a continuación.

La base biológica del proyecto es la estigmergia, que es un mecanismo de coordinación indirecta donde las hormigas modifican su entorno mediante el depósito de feromonas (Dorigo et al., 1996).

Biológicamente, esto se define como un sistema de retroalimentación positiva: a mayor rastro químico, mayor probabilidad de que otra hormiga siga la ruta, reforzándola. Teóricamente, el modelo debe contemplar la tasa de evaporación, un parámetro físico que permite al sistema olvidar rutas obsoletas y evitar óptimos locales (Baddeley et al., 2019).

La eficacia de las hormigas como controladores depende de su movilidad, sus trayectorias y la conectividad del entorno. Así que se explorarán diferentes enfoques de modelación basados en estructuras discretas e iterativas, seleccionando e implementando aquellos que resulten más adecuados con la formación académica, en este sentido se evita fijar un modelo desde el inicio y pasar por una etapa exploratoria. Se destaca que, en este proyecto la modelación se entiende como la construcción de una representación matemática discreta del movimiento de una hormiga, en la que el espacio se describe mediante estructuras como grafos, mallas o matrices, y la evolución del sistema se define mediante reglas que permiten analizar las trayectorias generadas, lo que se relaciona con autómatas celulares.

Desde la física y la matemática computacional, los autómatas celulares se usan para representar el espacio. Según Wolfram (2002), los autómatas celulares son sistemas discretos donde el estado de una celda depende de reglas locales y el estado de sus vecinos. Por ejemplo, en este sentido la hormiga de Langton (1986): Este modelo teórico es crucial, pues demuestra cómo un agente con reglas extremadamente simples, como girar a la derecha en cuadro negro, a la izquierda en blanco, genera un comportamiento emergente complejo. Otro ejemplo a destacar es el autómata celular del juego de la vida (Gardner, 1970), el cual aunque tiene reglas más complejas comparadas con el de Langton, al desarrollarse en matrices binarias y con lógica algorítmica, como en Burguillo (2018), es alcanzable para estudiantes de licenciatura en matemáticas y de física y con esto unido con reglas propuestas que simulen la memoria de feromonas, también envuelve a estudiantes de biología.

Adicionalmente, el recorrido de la hormiga también se puede modelar sobre un grafo $G = (V, E)$, donde V son los vértices que se relacionan con los puntos de interés (nido o alimento) y las aristas E son los posibles caminos. El objetivo es resolver una variante del problema del vendedor viajante conocido como TSP, buscando el camino de menor costo según distancia versus tiempo (Zhang et al., 2025). Los algoritmos de Optimización por Colonia de Hormigas conocidos como ACO, simulan agentes que recorren estos grafos probabilísticamente, donde la probabilidad de elegir un camino depende de la intensidad de la feromona τ y la visibilidad heurística η como se describe en (Dorigo et al., 1996) y (Ma et al., 2026). Por otro lado, también se encuentra la modelación de la búsqueda exploratoria biológica o comportamiento aleatorio aplicada al forrajeo, donde la colonia debe balancear la explotación de rutas conocidas y la exploración de nuevas áreas (Baddeley et al., 2019).

Este proyecto pretende profundizar en estos componentes teóricos y complementar para determinar una opción de modelación del recorrido de hormigas y cómo simularla computacionalmente con el uso de Python.

Objetivo General

Desarrollar un modelo de simulación computacional en Python que integre reglas biológicas, principios físicos y estructuras matemáticas discretas para representar y analizar trayectorias de hormigas.

Objetivos Esp., Productos y Resultados

1. Fundamentar teóricamente el comportamiento de las hormigas desde una perspectiva biológica.
2. Formular posibles modelos matemáticos para el comportamiento de hormigas.
3. Diseñar e implementar un algoritmo en lenguaje Python que simule el movimiento de hormigas sobre una estructura discreta.
4. Visualizar y analizar las trayectorias de hormigas generadas por la simulación computacional.
5. Presentar los resultados académicos en al menos un evento académico.

Productos: simulador, visualizaciones, informe.

Resultados: modelo matemático y análisis de trayectorias.

Impactos Esperados

El desarrollo de esta propuesta de semillero de investigación generará principalmente los impactos a continuación:

1. Impacto Académico y Formativo: Se espera transformar el proceso de aprendizaje de los estudiantes de la Universidad de Nariño, rompiendo las barreras disciplinares. Al integrar la Biología, la Física y las Matemáticas en un proyecto común, los participantes desarrollarán diferentes competencias y habilidades técnicas en programación con Python.
2. Impacto Científico y Tecnológico: La simulación y visualización con Python de la trayectoria de hormigas aporta con una herramienta computacional.
3. Impacto Social y Regional: La interdisciplinariedad del equipo investigador ayudará a tener estudiantes más preparados para la sociedad.

Resultados Esperados

Categoría	Producto
Tecnológico	Simulación en Python: Implementación o software funcional que permita modelar trayectorias de hormigas.
Científico	Informe técnico de resultados: Documento que analice la coherencia entre el modelo computacional desarrollado y los comportamientos biológicos observados en la literatura científica.
Apropiación Social	Ponencia o póster científico: Presentación de los resultados en un evento de investigación regional o nacional.
Formativo	Consolidación del grupo de estudio: Un equipo interdisciplinar de estudiantes capacitados en el uso de herramientas computacionales aplicadas a las ciencias naturales.

Metodología

El proyecto se desarrollará siguiendo las siguientes fases metodológicas:

Fase de indagación: Revisión bibliográfica sobre etología de hormigas, formulación matemática y algoritmos. Se destaca que se explorarán distintos modelos discretos sin fijar uno desde el inicio.

Fase de modelado: Definición de las reglas locales basadas en los procesos biológicos que describen el comportamiento de las hormigas, la física de partículas y reglas de autómatas, entre otras que se identifiquen en la fase de indagación.

Fase de programación: Desarrollo del código en Python.

Fase de análisis y socialización: Análisis y presentación de resultados en eventos académicos.

Fase final: Formulación de informes y recopilación de resultados.

Cronograma

Meses 1-2: formación. Meses 3-4: modelación. Meses 5-7: implementación. Meses 8-10: análisis. Meses 11-12: socialización y realización del informe final.

Presupuesto

Se consideran recursos para papelería, bibliografía y movilidad académica. El software utilizado será Python el cual es libre.

Normas de Bioseguridad

El proyecto no involucra muestras biológicas ni trabajo de campo. Se respetarán normas institucionales de ética e investigación.

Referencias Bibliográficas

Andersen, A. N., Majer, J. D. (2002). Ants and plant communities: why are ants so important in reconstruction and conservation? *Journal of Applied Ecology*, 39(4), 704-706. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00704.x>

Baddeley, R. J., Franks, N. R., Hunt, E. R. (2019). Optimal foraging and the information theory of gambling. *Journal of the Royal Society Interface*, 16(157). <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0435>

Bautista-Giraldo, M., et al. (2025). Simulating ant foraging dynamics under habitat fragmentation. *Global Ecology and Conservation*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12107273/>

Benavides Machado, P. (2020). El control natural de insectos en el ecosistema cafetero colombiano. En *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 1, Cap. 1, pp. 1-28). Cenicafé. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4233/1/CAP1.pdf>

Burguillo, J. C. (2018). Cellular Automata. En *Self-organizing Coalitions for Managing Complexity* (Emergence, Complexity and Computation, Vol. 29, pp. 63-79). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69898-4_4

Bustos, J., Ulloa-Chacón, P. (1997). Diversidad de hormigas (Hymenoptera: Formicidae) en un gradiente sucesional del bosque nublado (Nariño, Colombia). *Revista de Biología Tropical*.

Gardner, M. (1970). Mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 223(4), 120-123.

Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29-41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2012). *Primera caracterización biológica de hormigas del proyecto "Incorporación de la Biodiversidad en el sector cafetero en Colombia"*. GBIF.org. <https://www.gbif.org/dataset/6e2745d1-ebfe-400a-ae9f-81b405ae09bb>

Fonte, S. J., et al. (2023). Ants as bioindicators of soil function in tropical agricultural systems. *Applied Soil Ecology*. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.001954>

Hartman, S., Ryan, S. D., Karamched, B. R. (2024). Walk this way: modeling foraging ant dynamics in multiple food source environments. *Journal of Mathematical Biology*.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11392994/>

Langton, C. G. (1986). Studying artificial life with cellular automata. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 22(1-3), 120-149. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(86\)90237-X](https://doi.org/10.1016/0167-2789(86)90237-X)

Ma, C., Sun, B., He, H., Hu, W., Li, G., Li, T. (2026). An improved ant colony optimization algorithm based on adaptive parameter adjustment and elite strategy. En *2026 IEEE 8th International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)* (pp. 1484-1489). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/CISCE69494.2026.11504646>

Shiraishi, M., Takeuchi, R., Nakagawa, H., Nishimura, S. I., Awazu, A., Nishimori, H. (2019). Diverse stochasticity leads a colony of ants to optimal foraging. *Scientific Reports*, 9(1), 163. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36701-w>

Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.

Zhang, J., Chen, J., Chen, J., Zhou, Y., Hu, K., Zhang, Y. (2025). Solution to the TSP problem based on the improved ant colony algorithm. En *2025 40th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)* (pp. 2652-2657). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/YAC66630.2025.11149710>