

# Diseño de pruebas en un entorno aleatorio para exploración por medio de drones con inteligencia de enjambre

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería en Computadores  
Proyecto de Diseño de Ingeniería en Computadores  
Jose Ignacio Granados Marín

**Resumen**—La exploración de un territorio aleatorio, mediante un único drone, es una actividad que puede llegar a tomar más tiempo del necesario, consumir más recursos de los que se encuentran disponibles, demandar más pruebas de las estimadas e incluso, dificultar los objetivos que se hayan establecido previamente para su debido uso. Por lo que, se propone la implementación de métodos de exploración coordinada con el objetivo principal de observar y analizar su respectivo comportamiento, ante entornos aleatorios interiores, de tamaño y forma variable. El proyecto desarrollado, involucró la selección de un algoritmo de inteligencia de enjambre (optimización de enjambre de partículas PSO), mediante una investigación profunda y comparativa. De tal manera que, el mismo fuera viable, para su posterior adaptación, a los objetivos de exploración, en vista de las capacidades de los drones *Crazyflie 2.0*. Además, para comprobar la eficiencia de la inteligencia de enjambre seleccionada, se realizó la implementación de un entorno de pruebas aleatorio, por medio del uso de la biblioteca de *Pybullet*. Asimismo, se propusieron cuatro posibles caminos de implementación del software antes mencionado, por medio del estudio, análisis y verificación del firmware del drone *Crazyflie 2.0*. Finalmente, se desarrolló un sistema de software, en el cual, a través de tres ventanas interactivas, se solicita al usuario la cantidad de drones que desea simular, se muestra la simulación en ejecución y se despliegan cada una de las estadísticas más relevantes del algoritmo de optimización de enjambre de partículas.

## I. INTRODUCCIÓN

La exploración de un territorio aleatorio, mediante un único drone, es una actividad que puede llegar a tomar más tiempo del necesario, consumir más recursos de los que se encuentran disponibles, demandar más pruebas de las estimadas e incluso, dificultar los objetivos que se hayan establecido previamente para su debido uso. Por lo que, se propone la implementación de métodos de exploración coordinada con el objetivo principal de observar y analizar su respectivo comportamiento, ante entornos aleatorios interiores, de tamaño y forma variable.

Dada la problemática anterior, el proyecto consiste en modelar un conjunto de drones *Crazyflie*, en la herramienta de software de modelado de física de *Pybullet*, codificados mediante inteligencia de enjambre, el cual tendrá como objetivo general, explorar un determinado territorio aleatorio, en su totalidad, para la captura de información del mismo. De tal manera que, el propósito del producto en cuestión,

consiste en analizar el comportamiento de dicho conjunto de dispositivos, con algoritmos de comunicación coordinada y conjunta.

A su vez, el proyecto en cuestión, se encuentra delimitado a la implementación de

- Algoritmo de inteligencia enjambre: este algoritmo será el encargado de mantener una comunicación activa entre cada uno de los drones del conjunto de prueba. De manera que, se explore, en su totalidad y de una forma eficiente y eficaz, el entorno aleatorio seleccionado para tal estudio.
- Drones *Crazyflie* en *Pybullet*: estos corresponderán a los diseños del conjunto de drones de prueba que será utilizado para analizar el entorno aleatorio. Dichos modelos, serán diseñados por medio de la herramienta de software de *Pybullet*.
- Entorno de pruebas aleatorio en *Pybullet*: este ambiente será utilizado como modelo de pruebas para analizar el comportamiento de la inteligencia de enjambre de los drones, con el objetivo de que dicho algoritmo, se capaz de adaptarse a cualquier tipo de escenario de exploración. El entorno antes mencionado, será desarrollado por medio de la herramienta de software de *Pybullet*, la cual permitirá realizar las diversas simulaciones pertinentes.

Por su parte, el producto a desarrollar, forma parte de un sistema más complejo, el cual busca explorar diversos espacios y territorios, por medio del uso de inteligencia de enjambre. A su vez, el objetivo principal de dicho proyecto, se basa en que múltiples drones generen espacios tridimensionales, a través de la implementación de técnicas de estimación de fondo monocular. Por lo que, dadas proyecciones anteriores y el alcance del producto a desarrollar, solo se desarrollarán las secciones antes mencionados. Sin embargo, se espera que estos módulos contribuyan ampliamente al proyecto antes mencionado.

## II. ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE)

Algunos conceptos necesarios que brindan el contexto suficiente para comprender el proyecto y su respectiva implementación, son los siguientes:

- **Drone:** Los drones pueden ser definidos como vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés) o sistemas de aeronaves no tripuladas. Esencialmente, un drone es un robot volador que puede ser controlado de forma remota o volar de forma autónoma, utilizando algoritmos de vuelo, controlados por software, en sus sistemas integrados y empotrados. Algunos componentes básicos de dichos dispositivos son controladores de velocidad, controlador de vuelo, sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés), batería, antenas, receptores, cámaras, sensores, acelerómetro, altímetro, entre muchos otros. Actualmente, los drones son utilizados en una gran variedad de funciones civiles como búsqueda y rescate, vigilancia, monitoreo de tráfico, monitoreo del clima, extinción de incendios, uso personal, fotografía, videografía, agricultura, servicios de entrega e investigación [2].
- **Algoritmo de inteligencia de enjambre:** Un algoritmo de inteligencia de enjambre (SI por sus siglas en inglés) consiste en un método de software que permite simular la inteligencia de grupo biológico. El paralelismo potencial y las características distribuidas de los algoritmos SI permiten la posibilidad de resolver problemas no lineales complejos con capacidades avanzadas en términos de autoadaptabilidad, robustez y capacidad de búsqueda. Actualmente, se ha desarrollado una gran cantidad de SI como optimización de enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés), optimización de colonias de hormigas (ACO por sus siglas en inglés), colonia de abejas artificiales (ABC por sus siglas en inglés), entre muchos otros [3].
- **Entorno de pruebas:** Un entorno de pruebas consiste en aquella interfaz de hardware, software, configuraciones de red o datos, según se requiera, necesarios para ejecutar las pruebas de verificación de un determinado sistema. Esencialmente, dicha herramienta debe replicar el ambiente de producción y ser configurado de acuerdo con las necesidades del producto que se encuentre en desarrollo. Independientemente del proyecto, el ambiente de pruebas debe ser configurado con precisión para garantizar que el producto funcione en las condiciones adecuadas. En caso de la aparición de posibles fallas, las mismas representarán situaciones del mundo real que pueden ser analizadas desde un entorno de software [4].
- **Pybullet:** *Pybullet* es un módulo de *Python* que es utilizado para realizar simulaciones de física, robótica y aprendizaje de refuerzo profundo basado en *Bullet Physics SDK*. Dicha herramienta de software permite

cargar cuerpos articulados desde URDF, SDF y otros formatos desde el explorador de archivos. Además, *Pybullet* proporciona simulación de dinámica directa, cálculo de dinámica inversa, cinemática directa e inversa y detección de colisiones y consultas de intersección de rayos. Asimismo, este módulo admite renderizado, con un renderizador de CPU, visualización OpenGL y soporte para cascos de realidad virtual [5].

- **Algoritmo de optimización de enjambres de partículas:** El *algoritmo de optimización de enjambres de partículas (PSO)* representa una técnica de optimización metaheurística bien conocida debido a su fácil implementación en problemas complejos y no supervisados. Es una técnica confiable que se ha utilizado para tratar varios problemas de optimización. De hecho, se basa en un modelo físico en el que sus reglas de transición se construyen imitando el comportamiento colectivo social observado por bandadas de aves y bancos de peces. El PSO inicializa un enjambre de partículas en el que atraviesan el espacio de búsqueda en busca de una mejor posición global óptima. De hecho, cada partícula representa una solución potencial al problema planteado [6].

Por otra parte, los creadores oficiales del proyecto completo en cuestión, hasta la fecha no han logrado desarrollar o finalizar un producto en concreto, con base en los objetivos de exploración planteados. Sin embargo, un conjunto de investigadores de TU Delft, Países Bajos, Universidad de Barcelona y la Universidad de Harvard, han desarrollado un pequeño enjambre de drones *Crazyflie* modificados, que pueden detectar y localizar, de forma autónoma, fuentes de gas en ambientes interiores como casas o edificios. Dichos dispositivos, fueron programados con el algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) e inteligencia artificial (AI). De tal manera que, cuando un drone detecte una fuente de gas, comunique a los demás, para que colaboren entre sí y de esa forma, encuentren el origen de la fuga lo más pronto posible [1]. El proyecto anterior, evidencia la búsqueda de soluciones, por medio de inteligencia de enjambre, para el control de drones *Crazyflie* en determinados ambientes o entornos de prueba. A pesar de que, el objetivo del producto a desarrollar no es la búsqueda de una fuga de gas en particular, es posible considerar el proyecto anterior como una base y referencia para analizar el futuro comportamiento y resultado del algoritmo de inteligencia de enjambre que se vaya a desarrollar y probar.

## III. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN DESARROLLADA

Como se mencionó anteriormente, la exploración de un territorio, por medio de un único drone, es una actividad que puede llegar a tomar más tiempo, consumir más recursos, demandar más pruebas y dificultar los objetivos establecidos de uso. Por lo tanto, para que el proceso en cuestión sea más eficiente, se propuso la implementación de métodos de exploración coordinada. De tal manera que, una posible solución a este problema fue el uso de algoritmos de

inteligencia de enjambre, con los cuales, un grupo de drones se comunicó entre sí, para que cada uno de ellos explorara partes o secciones del territorio seleccionado, que otro no haya explorado con anterioridad.

El proyecto desarrollado, involucró la selección de un algoritmo de inteligencia de enjambre (optimización de enjambre de partículas PSO), mediante una investigación profunda y comparativa de este tipo de algoritmos en particular, así como el respectivo análisis de su funcionamiento. De tal manera que, el mismo fuera viable, para su posterior adaptación, a los objetivos de exploración de territorios aleatorios, en vista de las capacidades de los drones *Crazyflie 2.0*.

Además, para comprobar la eficiencia de la inteligencia de enjambre seleccionada, se realizó la implementación de un entorno de pruebas aleatorio, por medio del uso de la biblioteca de *Pybullet*. Dicho diseño, se basó en el croquis de una casa con paredes de diversos tamaños, formas y posiciones. De tal manera que, la misma permitió observar el comportamiento de los drones, en un ambiente completamente simulado y controlado de tres dimensiones.

Asimismo, el usuario final, tiene la posibilidad de seleccionar la cantidad de drones que desea colocar a prueba en la simulación. Lo anterior, con el objetivo principal de que el mismo, sea capaz de observar y conocer el efecto de esta variable, en el algoritmo de inteligencia de enjambre implementado. Adicionalmente, luego de la finalización de la simulación, la solución muestra la cantidad de interacciones del algoritmo, la mejor posición global entre los drones, el mejor criterio de selección del enjambre y la población simulada. La información anterior, se utilizó como insumo principal para la documentación de las ventajas y desventajas del uso del algoritmo en cuestión, en temas de exploración de territorios.

Finalmente, se propusieron cuatro posibles caminos de implementación del software antes mencionado, por medio del estudio, análisis y verificación del firmware del drone *Crazyflie 2.0*. Lo anterior con el objetivo principal de que, en futuras etapas del proyecto, sea posible la evaluación y determinación de la forma más eficiente de adicionar el producto desarrollado a los dispositivos antes mencionados.

Por otra, en las figuras 1, 2, 3, 4 y 5, muestran los diagramas UML de relación de componentes, clases, funcionalidad, contexto e interacción respectivamente, los cuales detallan de forma técnica, cada uno de los módulos, flujos y usos que dispone el sistema desarrollado, así como sus características principales de implementación.

#### IV. RESULTADOS

En la figura 6, se muestran cada una de las ventanas que se ven involucradas durante el uso de producto desarrollado. En la primera ventana, se puede observar la interacción

directa entre el hiperparámetro de la cantidad de drones, con el usuario, ya que es esta representación donde el mismo puede variar el resultado de la simulación. En la segunda ventana, se muestra la simulación en ejecución, donde el conjunto de cada una de las esferas de color negro, representa el enjambre de drones, con base en la cantidad insertado por el usuario en la ventana anterior. Además, el usuario es capaz de acercarse o alejar la vista de la ventana, en incluso, rotarla horizontal y verticalmente, de tal manera que, se pueda observar la simulación desde diferentes perspectivas y ángulos. Finalmente, en la tercera ventana, se despliegan cada una de las estadísticas más relevantes del algoritmo de optimización de enjambre de partículas, una vez finalizada la simulación en su totalidad.

Por su parte, algunas de las fortalezas del producto desarrollado, son las siguientes:

- El uso de la aplicación es sencillo e intuitivo.
- La simulación es fluida y no muestra ningún tipo de error.
- La paleta de colores seleccionada permite distinguir adecuadamente cada componente de la simulación.
- La ventana de la simulación es de tamaño reajutable.
- La duración de la simulación es la relativamente corta, el tiempo depende de la cantidad de drones que el usuario ingrese a la aplicación.

Ahora bien, algunas de las debilidades del producto desarrollado, son las siguientes:

- El tamaño de letra de algunos textos es un poco pequeño, lo que dificulta su lectura.
- En la simulación, algunos drones traspasan las paredes y otros no desplazan debido a que detectan colisiones con objetos sólidos.
- El tamaño de los drones puede afectar la visualización de los mismos durante la simulación.

Por otra parte, los resultados relacionados con la verificación del firmware, acerca de posibles formas de implementar el algoritmo de inteligencia de enjambre seleccionado, en futuras etapas del proyecto, se muestran a continuación:

1. Personalización del firmware con Kbuild: esta propuesta consiste en integrar el algoritmo de inteligencia de enjambre desarrollado, a través de ciertos enlaces de Python, que provee el drone *Crazyflie 2.0*, junto con la creación de una interfaz entre C y el lenguaje antes mencionado, para que el Kbuild sea capaz de interpretar el algoritmo de optimización de enjambre de partículas.

2. Uso del Toolbelt: esta propuesta consiste en utilizar las funcionalidades necesarias que provea el Toolbelt del drone *Crazyflie 2.0*, para integrar el algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) desarrollado, por medio del uso de contenedores de Docker.
3. Adición de una nueva tarea al sistema: esta propuesta consiste en implementar el algoritmo de inteligencia de enjambre desarrollado, como una nueva tarea FreeRTOS del firmware del drone *Crazyflie 2.0*, en que la será necesaria la configuración del entorno de desarrollo, constantes y variables para que el dispositivo puede ser controlado por el algoritmo de inteligencia de enjambre.
4. Creación de plataforma propia: esta propuesta consiste en implementar el algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) desarrollado, como una nueva plataforma propia o personalizada para el drone *Crazyflie 2.0*, de manera que, el mismo pueda cumplir con los objetivos de exploración de territorios aleatorios, por medio del uso de técnicas de exploración coordinada.

## V. CONCLUSIONES

- La herramienta de *Pybullet* es un módulo de Python que resultó ser muy útil para llevar a cabo el desarrollo e implementación de la simulación, en tres dimensiones, requerida, dadas sus grandes capacidades, funcionalidades y sencillez de instalación, uso y aprendizaje.
- El algoritmo de optimización de enjambre de partículas, dado su comportamiento matemático de un gradiente que busca el mínimo o máximo local de una determinada expresión, no resultó ser adecuado para explorar la totalidad del territorio, ya que, el algoritmo calcula las rutas más cortas para satisfacer sus objetivos de optimización, en vez de, desplazar a los drones por todo el espacio disponible.
- El algoritmo de optimización de enjambre de partículas, tal vez no sea el más conveniente para ser aplicados con fines de exploración. Sin embargo, el mismo presenta un gran potencial para ser empleado en situaciones de emergencia, dado que el mismo, busca el camino más optimiza para llegar a un determinada localización, punto o lugar.
- El algoritmo de inteligencia de enjambre seleccionado, dadas sus características de comunicación coordinada, permitió que el producto desarrollado, no requiera de tanto poder computacional, ya que, con un promedio menor a 100 iteraciones por simulación, el algoritmo logra sus objetivos de convergencia y optimización.
- El uso del paradigma orientado a objetos (POO) en el producto desarrollado, permitió una amplia reutilización del código en múltiples secciones del mismo, ya que la creación de diversas partículas depende, en su totalidad, de la decisión del usuario.
- El drone *Crazyflie 2.0*, dado que es un modelo enfocado en la investigación, modificación y desarrollo de proyectos, facilita que la futura implementación del algoritmo de enjambre seleccionado, pueda ser realizado a través de diversas formas o caminos, mediante la interacción directa del firmware de dicho dispositivo.

## VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la búsqueda de una estrategia matemática, para que los drones sean capaces de identificar los objetos y obstáculos que se encuentra a su alrededor, para evitar posibles colisiones con el ambiente o entorno donde se encuentren.
- Se recomienda la modificación del algoritmo de optimización de enjambre de partículas, sin que se pierda su esencia de inteligencia de enjambre, para que el mismo, en vez de acercarse al mínimo o máximo local, se aleje de dicha localización, con el objetivo de que el conjunto de drones pueda explorar la mayor cantidad de territorio posible.
- Se recomienda la búsqueda, análisis y evaluación matemática de algoritmos de inteligencia de enjambre, que satisfagan los objetivos de exploración planteados, de tal forma que, se recorran los diferentes territorios aleatorios en su totalidad y no, de manera parcial.
- Se recomienda la revisión exhaustiva de código fuente y documentación pertinente de las diversas propuestas planteadas, relacionadas con la interacción del firmware de drone *Crazyflie 2.0*, con el objetivo de determinar cuál corresponde a la alternativa más óptima para su futura implementación.

## REFERENCIAS

- [1] Enjambre de diminutos drones autónomos para localizar fugas de gas — Iguana Robot. (s.f.). <https://www.iguanarobot.com/enjambre-de-diminutos-drones-autonomos-para-localizar-fugas-de-gas/>
- [2] Lutkevich, B., Earls, A. R. (2021, 7 diciembre). drone (UAV). IoT Agenda. <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/drone>
- [3] Sun, W., Tang, M., Zhang, L., Huo, Z., Shu, L. (2020). A survey of using swarm intelligence algorithms in IoT. *Sensors*, 20(5), 1420. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1420>
- [4] Bose, S. (2023, 8 enero). Test Environment: A Beginner's Guide. BrowserStack. <https://www.browserstack.com/guide/what-is-test-environment>
- [5] Pybullet. (2022, 20 mayo). PyPI. <https://pypi.org/project/pybullet/>
- [6] Qawqzeh, Y. (2021). Una revisión de la implementación de algoritmos de inteligencia de enjambre para la programación y optimización en entornos de computación en la nube. *PeerJ. Informática*, 7, E696. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.696>

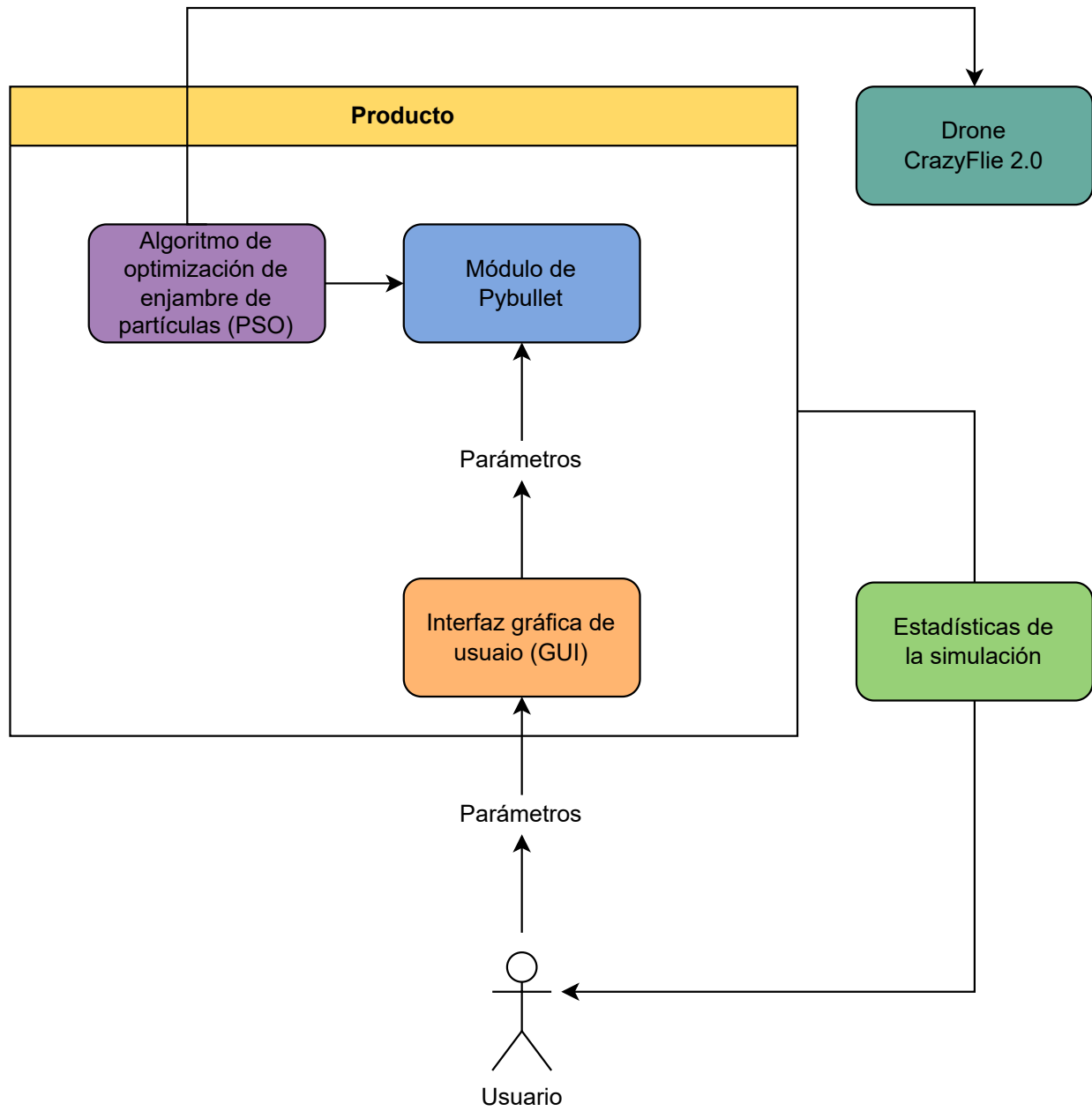


Figura 1: Diagrama de relación entre componentes del producto desarrollado.

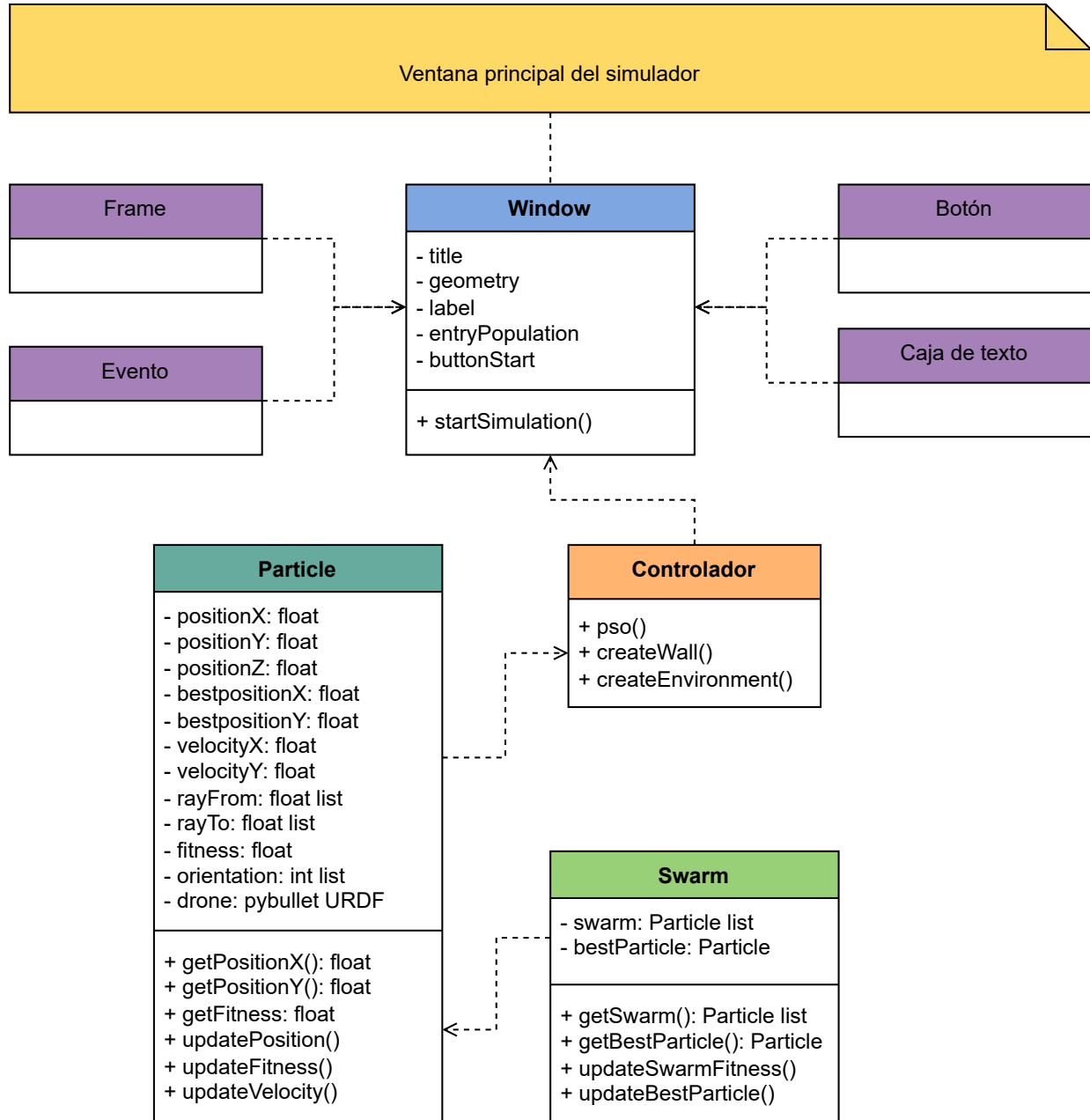


Figura 2: Diagrama de clases del producto desarrollado.

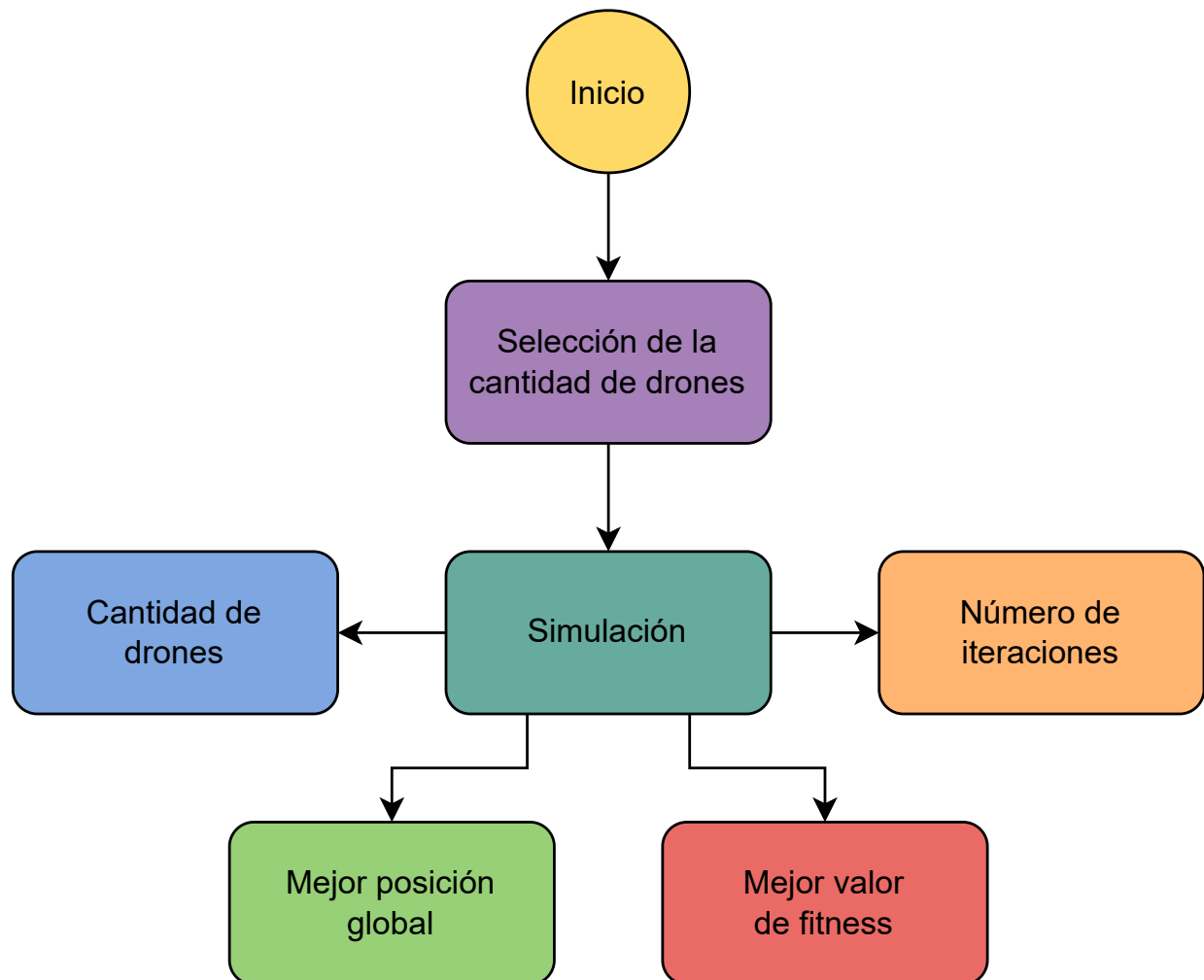


Figura 3: Diagrama de funcionalidad del producto desarrollado.

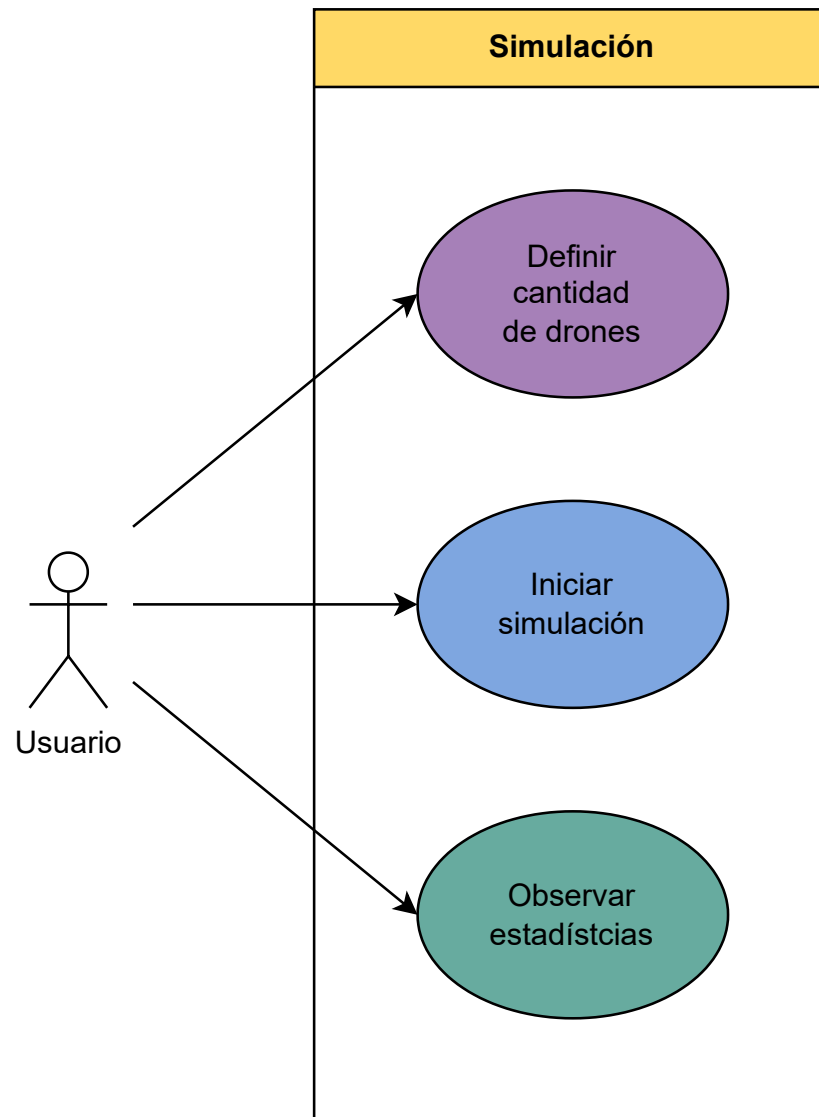


Figura 4: Diagrama de contexto del producto desarrollado.



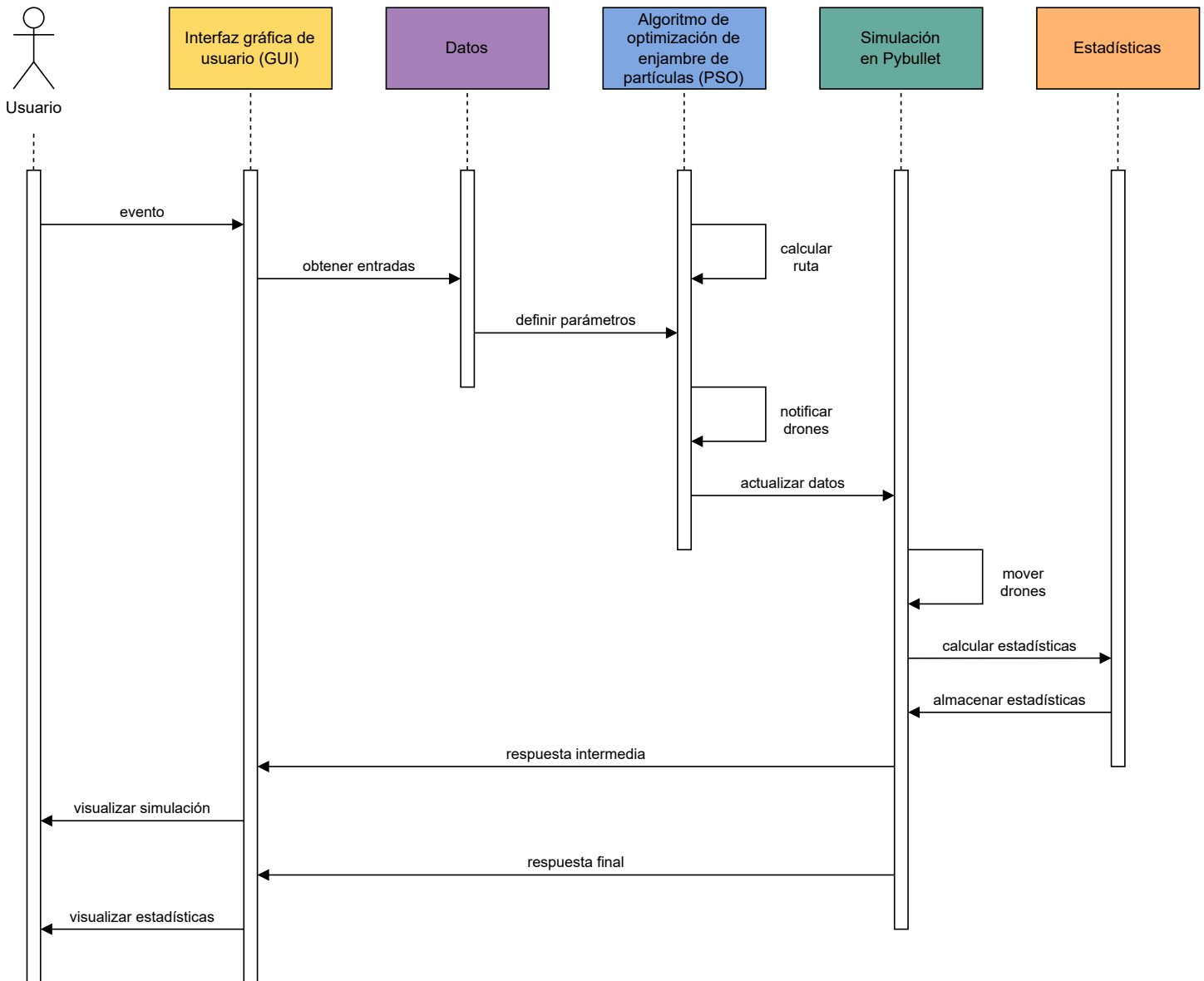


Figura 5: Diagrama de interacción del producto desarrollado.

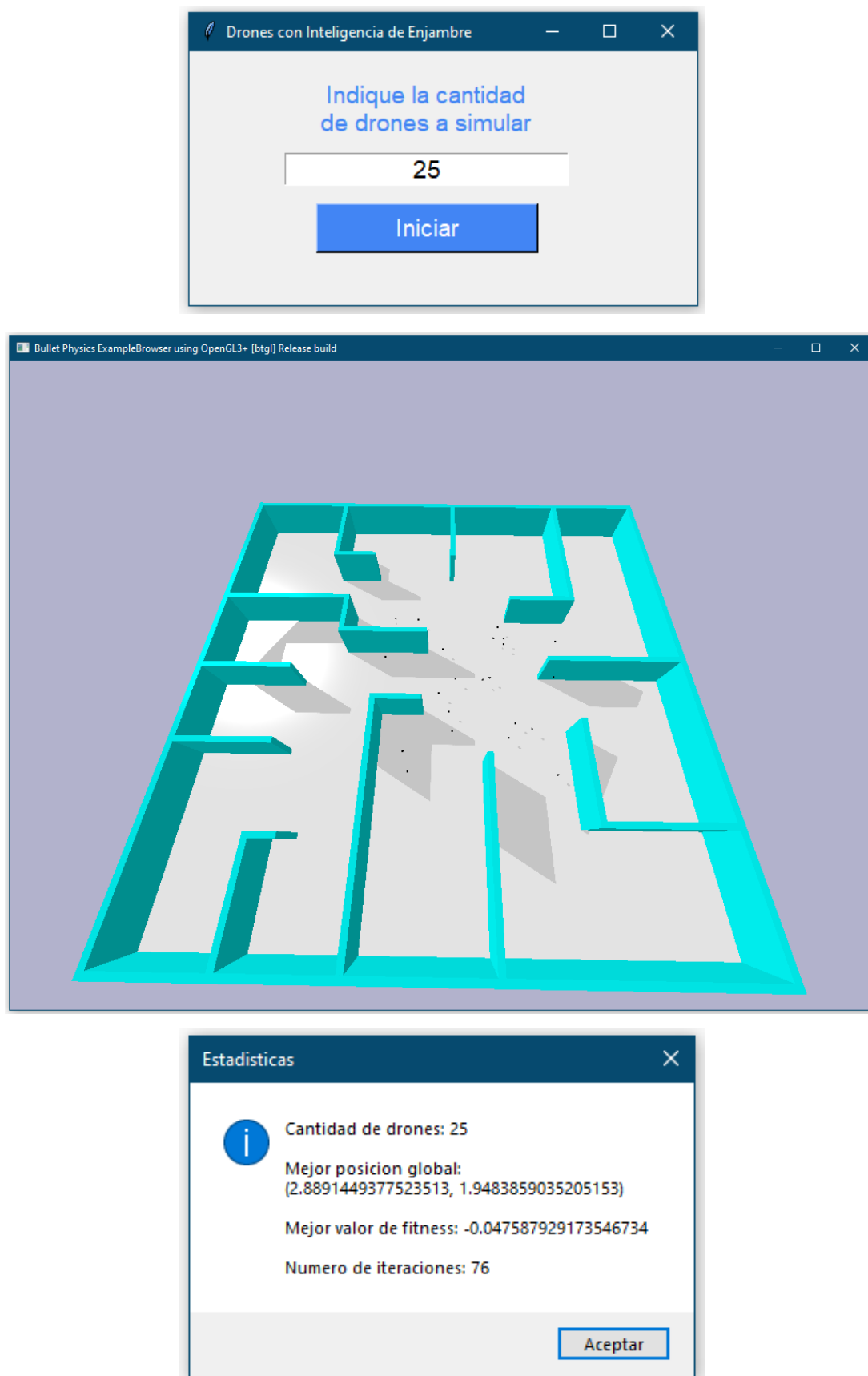


Figura 6: Resultados del producto desarrollado.