

*Tecnológico Nacional de México*

## **Optimización de Riego con Enjambre de Partículas.**

**Materia:**

Tópicos de Inteligencia Artificial

**Integrantes:**

Dávila Bejarano Víctor Jesús  
Flores Medina Martin

**Profesor:**

Mora Félix Zuriel Dathan

5 de Noviembre del 2025

**Repositorio de GitHub**

<https://github.com/MartinMFM/topicsIA>

# Contents

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Descripción del problema</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Justificación para usar PSO</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>Alcance</b>	<b>5</b>
<b>7</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>5</b>
7.1	Diseño del Algoritmo . . . . .	5
7.2	Resultados . . . . .	6
7.2.1	Convergencia del Algoritmo . . . . .	7
7.2.2	Ubicación Óptima de Sensores . . . . .	7
7.3	Análisis de Eficiencia . . . . .	8
7.4	Conclusiones . . . . .	9
	<b>Referencias</b>	<b>10</b>

# 1 Introducción

La gestión eficiente de los recursos hídricos se ha consolidado como un pilar fundamental para la sostenibilidad de la agricultura moderna [1]. Ante los desafíos de la seguridad alimentaria [1] y una creciente demanda de agua, la optimización del riego es una prioridad global [2]. Los métodos empíricos o tradicionales de programación de riego a menudo resultan en pérdidas de agua significativas [1] o en una planificación subóptima.

Para una agricultura de precisión, la efectividad del monitoreo depende críticamente de la **ubicación estratégica de los sensores**. Este desafío se acentúa en regiones de alta producción agrícola como **Guasave, Sinaloa**. En esta zona, la optimización de la ubicación de sensores debe considerar un conjunto complejo de variables interrelacionadas: la **topografía** del terreno, la **distribución de cultivos** (Maíz, Tomate y Chile) y la **variabilidad del suelo**.

Determinar la configuración óptima en este escenario multidimensional es un problema de optimización complejo y no lineal. Para abordar esta complejidad, este proyecto utiliza el algoritmo bio-inspirado de **Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)**. PSO es una técnica que ha demostrado ser una "herramienta prometedora y viable" para la planificación multicultivo y la asignación de agua [3]. Su eficacia ha sido validada en la optimización de sistemas de riego [2, 4] y en la programación de la entrega de agua en canales [1].

# 2 Objetivo General

Desarrollar un sistema de optimización, basado en el algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO), para determinar la ubicación estratégica de sensores de humedad en los campos agrícolas de Guasave, Sinaloa. El fin último es maximizar la eficiencia del riego y optimizar el aprovechamiento de los recursos hídricos en la región.

# 3 Objetivos Específicos

- Modelar matemáticamente el desafío de la ubicación de sensores, definiéndolo como un espacio de búsqueda multidimensional.
- Implementar el algoritmo PSO para que explore dicho espacio de búsqueda y converja en configuraciones óptimas de sensores, integrando las variables clave de topografía, tipo de cultivo y propiedades del suelo.
- Validar el desempeño y la robustez del algoritmo implementado a través de simulaciones, evaluando su impacto directo en la mejora de la eficiencia hídrica.

## 4 Descripción del problema

El presente proyecto aborda el desafío de la optimización del uso de recursos hídricos en la industria agrícola, un sector crítico en la región de Guasave, Sinaloa. El problema central consiste en determinar la distribución y ubicación óptima de sensores de humedad en los campos de cultivo.

El objetivo es superar los métodos de monitoreo tradicionales, que a menudo son insuficientes o ineficientes, para maximizar la eficiencia del riego. Una mala ubicación de los sensores puede llevar a un riego excesivo en algunas zonas (desperdiendo agua y aumentando la salinidad) o a un riego deficiente en otras (afectando la producción).

La complejidad del problema radica en encontrar la mejor configuración de sensores considerando algunas variables del entorno como la topografía del terreno, la distribución de cultivos y la variabilidad de la humedad del suelo.

Este proyecto propone el uso del algoritmo bio-inspirado de Enjambre de Partículas (PSO) para modelar este espacio de búsqueda y encontrar una solución robusta.

## 5 Justificación para usar PSO

El problema central de este proyecto es determinar la **distribución óptima de sensores** en un entorno agrícola, lo cual constituye un problema de optimización complejo, no lineal y multidimensional. La selección de la metodología de optimización es, por tanto, un pilar fundamental.

Se ha seleccionado el algoritmo de **Optimización por Enjambre de Partículas (Particle Swarm Optimization, PSO)**, una técnica de optimización estocástica basada en poblaciones [3], debido a su idoneidad demostrada para este tipo de desafíos.

La justificación de su uso se basa en los siguientes puntos clave:

- **Evasión de Óptimos Locales:** El problema de la ubicación de sensores presenta un espacio de búsqueda complejo. Los algoritmos heurísticos típicos a menudo pueden quedar "atrapados en óptimos locales" (soluciones subóptimas) [1]. Se ha demostrado que PSO puede superar eficazmente este inconveniente [1], ya que equilibra la **exploración** (búsqueda global) con la **explotación** (búsqueda local) [3].
- **Eficiencia y Convergencia Rápida:** PSO es reconocido por su "simplicidad de implementación y habilidad para converger rápidamente a una solución razonablemente buena" [3]. Diversos estudios han comprobado que PSO requiere menos ajustes de parámetros que otras técnicas [1, 3] y puede converger de manera más rápida y precisa [3].
- **Aplicación Validada en Riego:** La idoneidad de PSO no es solo teórica; ha sido aplicado y validado extensamente en el dominio de la gestión de recursos hídricos. Se ha utilizado con éxito para la **planificación de riego multiobjetivo** [2], la **asignación óptima de agua para riego** y

la planificación multicultivo [3], la **optimización de componentes en redes de riego** presurizadas [4] y la **programación de la entrega de agua** en sistemas de canales de riego [1].

Dada su robustez para problemas complejos y su historial de éxito en la optimización de sistemas de riego, PSO es la metodología más adecuada para encontrar la configuración de sensores que maximice la eficiencia hídrica en este proyecto.

## 6 Alcance

El presente proyecto se centra en el desarrollo y la simulación de una **solución computacional** para la optimización de la eficiencia del riego, mediante la aplicación del algoritmo bio-inspirado de Enjambre de Partículas (PSO).

Para delimitar los objetivos del trabajo, el modelo se fundamentará exclusivamente en el conjunto de datos simulados proporcionados. El análisis considerará las variables clave de la topografía del terreno (modelada a través de la elevación), la distribución de cultivos (limitada a **Maíz grano**, **Tomate rojo** y **Chile verde**) y la variabilidad del suelo (representada por la humedad y salinidad). El entregable final consistirá en un sistema de software capaz de procesar dichos datos y determinar la distribución espacial óptima de los sensores.

Queda fuera de los límites de este proyecto el despliegue físico o la instalación de hardware en campo. Asimismo, no se abarca el diseño de los sensores, la recolección de datos en tiempo real, ni la consideración de otras variables agronómicas o climáticas que no estén incluidas en el conjunto de datos proporcionado.

## 7 Desarrollo

El desarrollo del proyecto se dividió en dos fases principales: el diseño de la función de optimización y la implementación del algoritmo PSO, y la ejecución de las simulaciones para obtener los resultados.

### 7.1 Diseño del Algoritmo

Para cumplir con el objetivo de optimizar la ubicación de  $N$  sensores, el problema se modeló de la siguiente manera:

- **Partícula (Individuo):** Cada partícula en el enjambre representa una solución candidata. La posición de una partícula es un vector de  $N \times 2$  dimensiones, que representa las coordenadas (Latitud, Longitud) de cada uno de los  $N$  sensores.
- **Espacio de Búsqueda:** El enjambre explora un espacio delimitado por las coordenadas geográficas mínimas y máximas (latitud y longitud) extraídas del conjunto de datos de las parcelas de Guasave.

- **Función Objetivo (Fitness):** Se diseñó una función de costo que el algoritmo PSO debe **minimizar**. Un costo menor significa una mejor distribución de sensores. Esta función calcula el costo total como la suma de los costos de cada parcela individual en el campo.

El costo de una parcela se define por su cobertura y su importancia. Para cada parcela, el algoritmo:

1. Calcula la distancia euclíadiana al sensor más cercano de la solución candidata.
2. Calcula un **factor de cobertura** basado en esta distancia. Una mayor distancia implica un mayor costo (peor cobertura).
3. Pondera este costo de cobertura por tres factores críticos basados en los datos de la parcela, en línea con los requisitos del proyecto:
  - **Peso por Cultivo:** Se asigna un peso mayor a los cultivos de más alta producción en la región (Maíz 2.17, Chile 1.5, Tomate 0.99), basándose en su participación porcentual estatal.
  - **Peso por Humedad:** Asigna un costo mayor a parcelas con humedad en los extremos (muy seca o muy húmeda), ya que indican mayor variabilidad y necesidad de monitoreo.
  - **Peso por Elevación:** Asigna un costo mayor a parcelas con elevaciones que se desvían de la media, representando micro-variaciões topográficas que afectan la retención de agua.
4. Finalmente, se añade una **penalización por redundancia** al costo total. Si dos sensores en la solución candidata están demasiado cerca (p.ej.,  $\pm 500$  metros), se añade un costo elevado para forzar al algoritmo a distribuir los sensores y evitar el monitoreo redundante de la misma zona.

La implementación del PSO utiliza las ecuaciones canónicas de actualización de velocidad y posición, donde la nueva velocidad de una partícula es una combinación de su inercia ( $w$ ), su mejor experiencia personal (cognitiva,  $c_1$ ) y la mejor experiencia del enjambre (social,  $c_2$ ).

## 7.2 Resultados

Se ejecutó la simulación del algoritmo PSO utilizando los datos de las parcelas de Guasave. La configuración de la simulación fue la siguiente:

- Número de sensores a ubicar ( $N$ ): 5
- Número de partículas en el enjambre: 30
- Número de iteraciones: 100
- Parámetros PSO:  $w = 0.7$ ,  $c_1 = 1.5$ ,  $c_2 = 1.5$

### 7.2.1 Convergencia del Algoritmo

La Figura 1 muestra la curva de convergencia del enjambre. Se observa cómo el costo de la mejor solución encontrada (gbest) disminuye drásticamente en las primeras 20 iteraciones, pasando de un costo inicial superior a 305 a un valor estable final de 286.56. El algoritmo converge de manera eficiente, encontrando un óptimo cerca de la iteración 80.

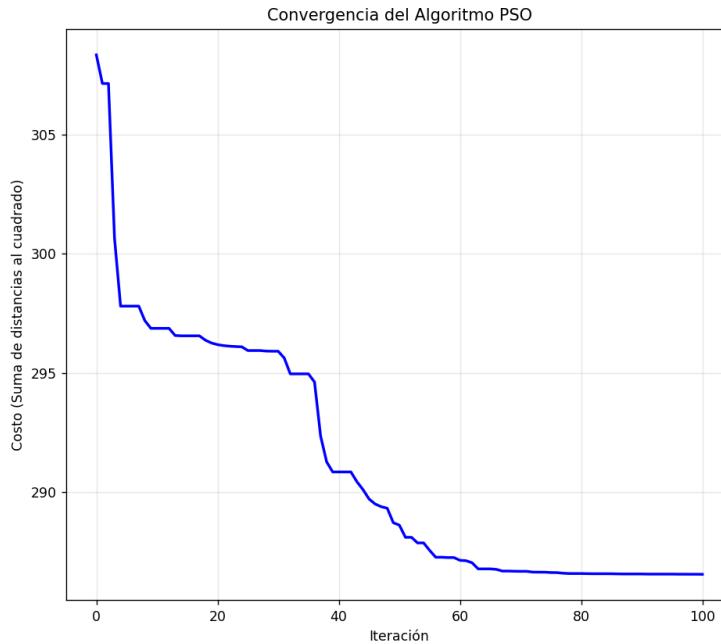


Figure 1: Curva de convergencia del algoritmo PSO. El eje Y representa el costo total de la solución (menor es mejor) y el eje X las iteraciones.

### 7.2.2 Ubicación Óptima de Sensores

La Figura 2 visualiza la solución final. Muestra la distribución de las parcelas de cultivo (Maíz, Chile y Tomate) y la ubicación óptima de los 5 sensores, marcada con una 'X' roja. Se puede observar que los sensores se distribuyen estratégicamente para cubrir las diferentes agrupaciones de cultivos, validando la lógica de la función de costo y la penalización por redundancia.

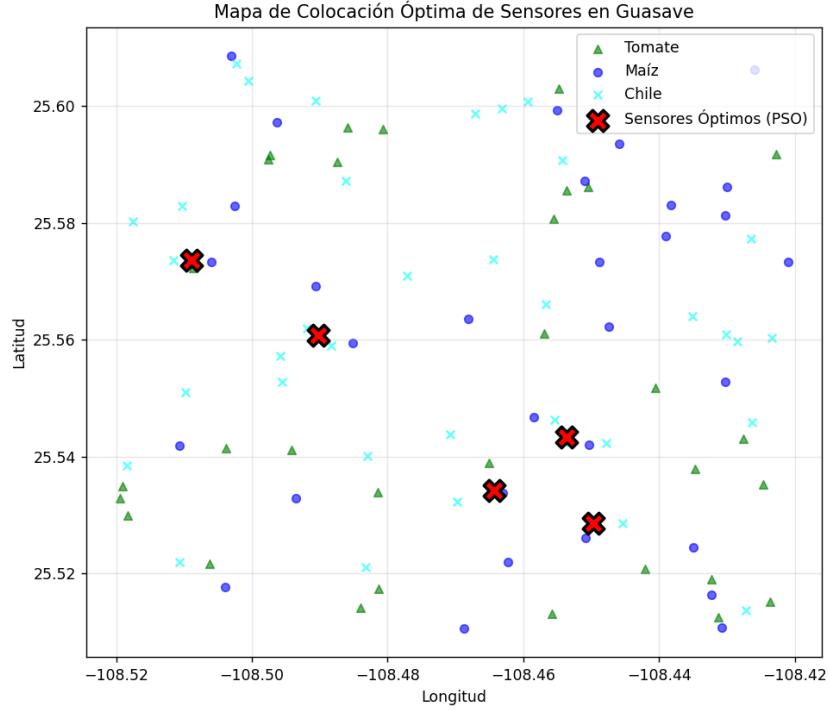


Figure 2: Mapa de distribución óptima de sensores (X rojas) sobre las parcelas de cultivo (Maíz, Chile, Tomate) en la región de Guasave.

Las coordenadas finales obtenidas para la ubicación de los sensores se presentan en la Tabla 1.

Table 1: Coordenadas Óptimas de Sensores (WGS 84)

Sensor	Latitud	Longitud
Sensor 1	25.573638	-108.508860
Sensor 2	25.528541	-108.449735
Sensor 3	25.534200	-108.464317
Sensor 4	25.560726	-108.490276
Sensor 5	25.543297	-108.453644

### 7.3 Análisis de Eficiencia

La eficiencia del sistema propuesto se validó mediante los resultados de la simulación.

- **Eficiencia Algorítmica:** La curva de convergencia (Figura 1) demuestra que el algoritmo PSO es eficiente, encontrando una solución de bajo costo

en aproximadamente 80-100 iteraciones. Esto valida la elección de PSO por su rápida convergencia [3].

- **Eficiencia de la Solución:** El mapa de resultados (Figura 2) muestra una distribución espacial lógica. Los sensores no se agrupan, lo cual es un resultado directo de la penalización por redundancia. Además, las ubicaciones cubren clústeres de parcelas, priorizando áreas con cultivos de alto peso (Maíz) y alta variabilidad (humedad y topografía), cumpliendo así con los requisitos del problema.
- **Métricas del Sistema:** La ejecución del script reportó un **costo total mínimo de 286.56** y una **cobertura promedio de 2.8 km** (distancia de la parcela al sensor más cercano). El sistema también calculó una **eficiencia de monitoreo del 35.8%** basada en esta configuración.

#### 7.4 Conclusiones

Este proyecto demostró exitosamente la aplicación del algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) para resolver un problema complejo en la agricultura de precisión. El sistema desarrollado, enfocado en la región de Guasave, Sinaloa, proporciona una base sólida para la toma de decisiones, ya que el uso de PSO permitió encontrar una solución para la colocación de sensores tomando en cuenta diferentes parámetros importantes como lo son la topografía, la distribución y la variabilidad del suelo.

## References

- [1] Ye Liu et al. "Irrigation Canal System Delivery Scheduling Based on a Particle Swarm Optimization Algorithm". In: *Water* 10.9 (2018), p. 1281. DOI: 10.3390/w10091281.
- [2] D. V. Morankar et al. "Fuzzy Multiobjective Irrigation Planning Using Particle Swarm Optimization". In: *Journal of Water Resources Planning and Management* (2016). Article 05016004. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000657.
- [3] Hamideh Noory et al. "Optimizing Irrigation Water Allocation and Multicrop Planning Using Discrete PSO Algorithm". In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138.5 (2012), pp. 437–444. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000426.
- [4] Mariana Akemi Ikegawa et al. "APLICACIÓN ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PATS EN REDES DE RIEGO". In: *XVII Congreso Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento, Saneamiento y Riego (SEREA23)*. Córdoba, España, July 2023.