

# Comparación PSO en Optimización Continua

## Análisis de Variantes de Parámetros vs. Algoritmo Genético

Flores Linares Oscar Daniel

Cómputo Evolutivo - UNAM

28 de noviembre de 2025

# ¿Por qué estudiar PSO?



## Algoritmo bio-inspirado simple pero poderoso

El PSO (Optimización por Enjambre de Partículas) muestra la inteligencia colectiva, logrando soluciones robustas con una lógica bastante entendible.



## Alternativa a métodos evolutivos tradicionales (AG)

Ofrece una perspectiva diferente para resolver problemas complejos, complementando o superando a los Algoritmos Genéticos en ciertos escenarios.



## Amplio uso en industria e investigación

Su eficacia lo ha posicionado como una herramienta clave en optimización de sistemas, logística y aprendizaje automático en diversos sectores.

## → Preguntas clave

- ¿Cómo se compara PSO con AG?
- ¿Qué configuración de parámetros es mejor para PSO?

# Objetivos del Estudio

01

## Comparar 3 variantes de PSO con diferentes parámetros

Analizaremos cómo las modificaciones en los pesos de inercia y los coeficientes cognitivos/sociales afectan el rendimiento del algoritmo.

02

## Evaluar PSO vs Algoritmo Genético (AG)

Determinaremos las fortalezas y debilidades de cada enfoque en un conjunto de problemas de optimización continua.

03

## Analizar desempeño en 5 funciones benchmark

Utilizaremos funciones estándar de optimización para asegurar una comparación justa y reproducible entre los algoritmos.

04

## Probar en 2 dimensiones (10D y 30D)

Investigaremos cómo la complejidad del espacio de búsqueda (número de dimensiones) influye en la eficacia de cada algoritmo.

05

## Obtener resultados estadísticamente robustos (30 repeticiones)

Realizaremos múltiples ejecuciones para minimizar el impacto de la aleatoriedad y asegurar la validez de nuestras conclusiones.

3 variantes de PSO

Diferentes parámetros

Repeticiones

30 corridas por caso

Protocolo de evaluación

1 Algoritmo Genético

Configuración estándar

Pruebas por dimensión

10D y 30D

Evaluación en funciones

Sphere, Ackley, Griewank, Rastrigin y Rosenbrock

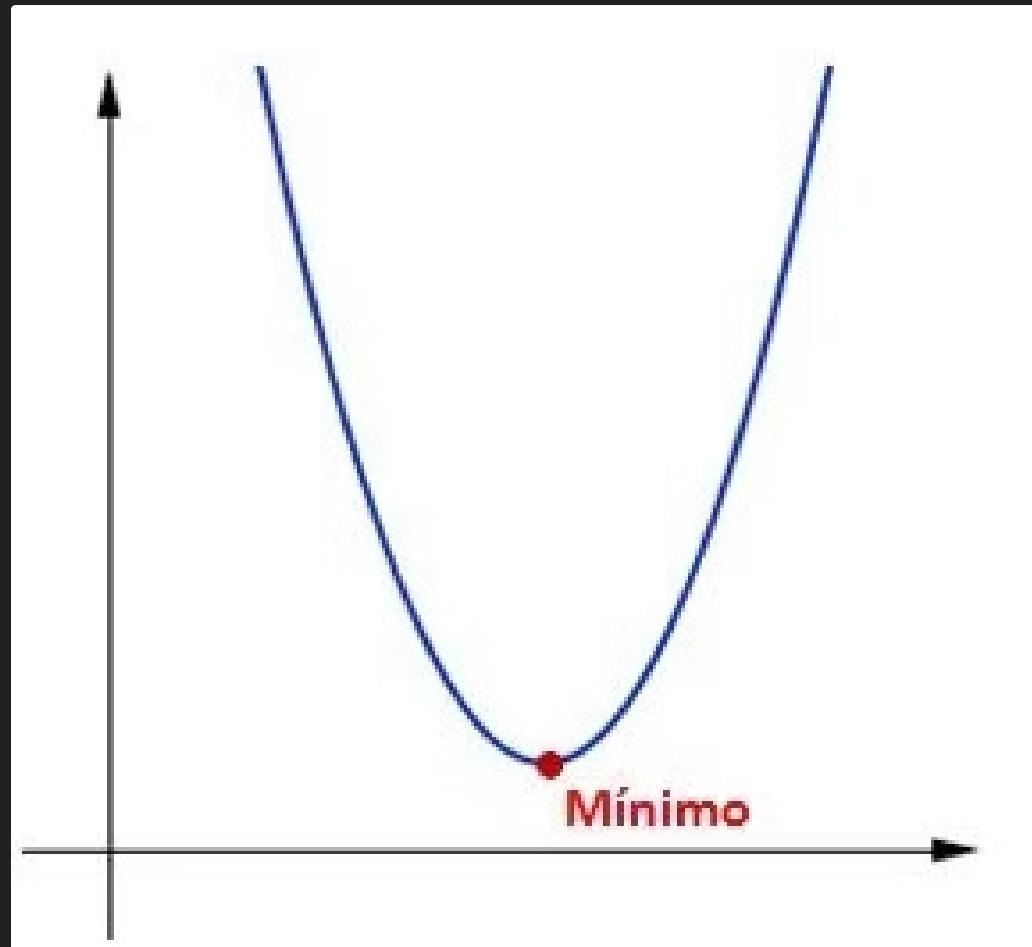
# El Problema: Optimización Continua

## Definición

Encontrar el mínimo (o máximo) de una función  $f(x)$  donde  $x \in \mathbb{R}^n$ .

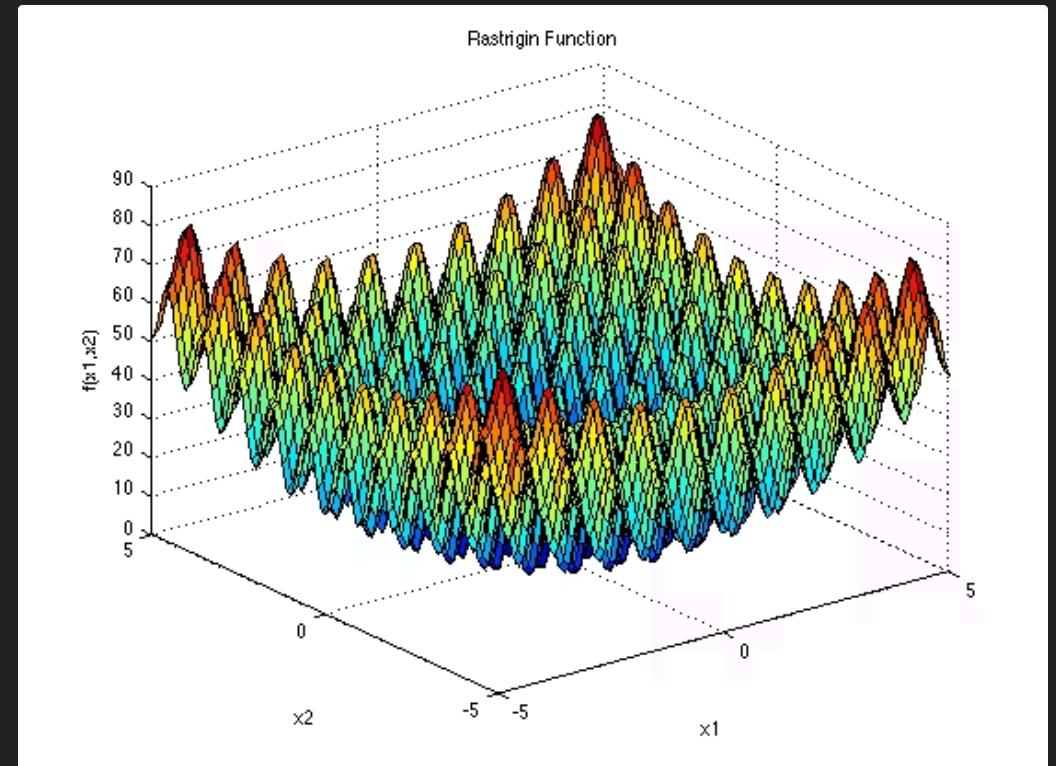
### Función simple

Fácil: un solo mínimo, función suave



### Función compleja

Difícil: muchos mínimos locales, no derivable



### El reto

- Métodos clásicos (gradiente) **fallan** en funciones complejas
- Algoritmos bio-inspirados son la alternativa

# ¿Qué son los Algoritmos Bio-Inspirados?

**Definición:** Algoritmos de optimización que imitan comportamientos de la naturaleza para resolver problemas complejos.

- **No requieren derivadas**

Funcionan de forma adecuada en funciones no diferenciables, lo cual es una limitación para métodos tradicionales.

- **Usan población de soluciones**

Exploran el espacio de búsqueda con muchos candidatos al mismo tiempo, aumentando las chances de encontrar el óptimo global.

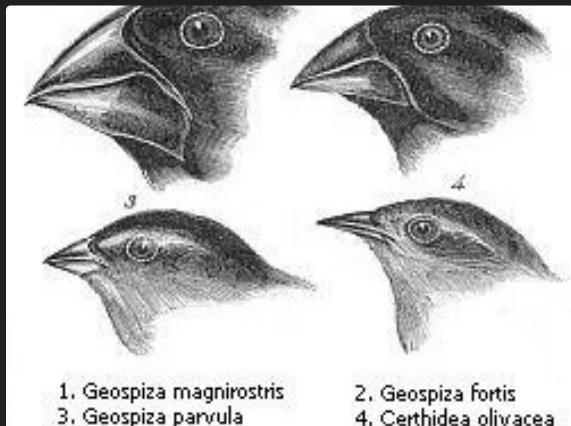
- **Tienen componente estocástico**

La aleatoriedad ayuda a escapar de óptimos locales y encontrar nuevas regiones del espacio de soluciones.

- **Pueden escapar óptimos locales**

Su diseño les permite evitar quedarse atascados en soluciones subóptimas, buscando el mejor resultado posible.

Algoritmo	Inspiración	Metáfora
AG	Evolución natural	"Sobrevive el más apto"
PSO	Enjambres (aves, peces)	"Seguir al líder del grupo"
ACO	Hormigas buscando comida	"Feromonas"
DE	Evolución diferencial	"Mutación y selección"

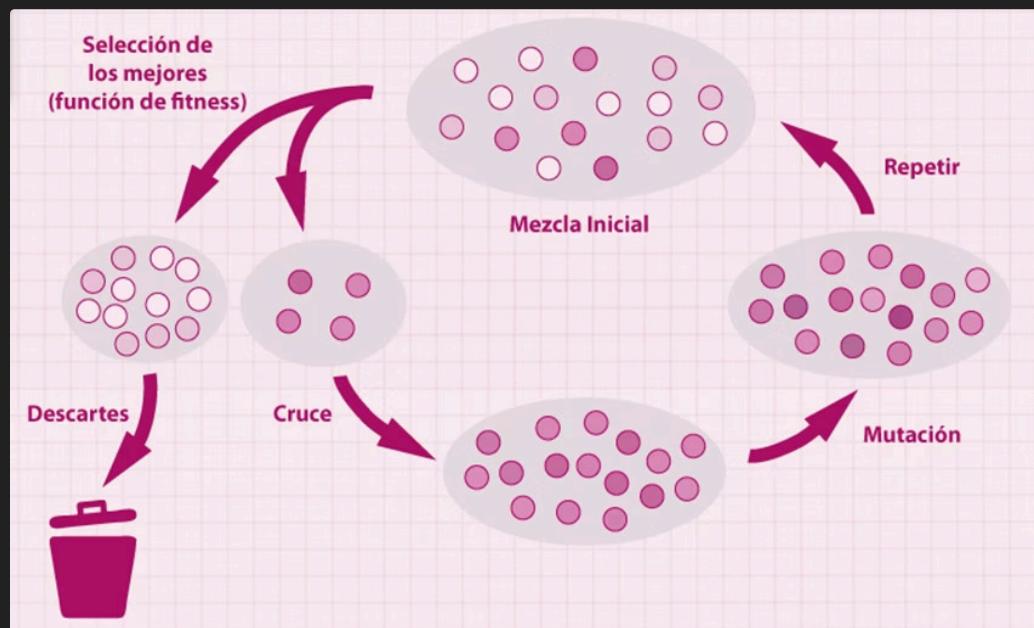
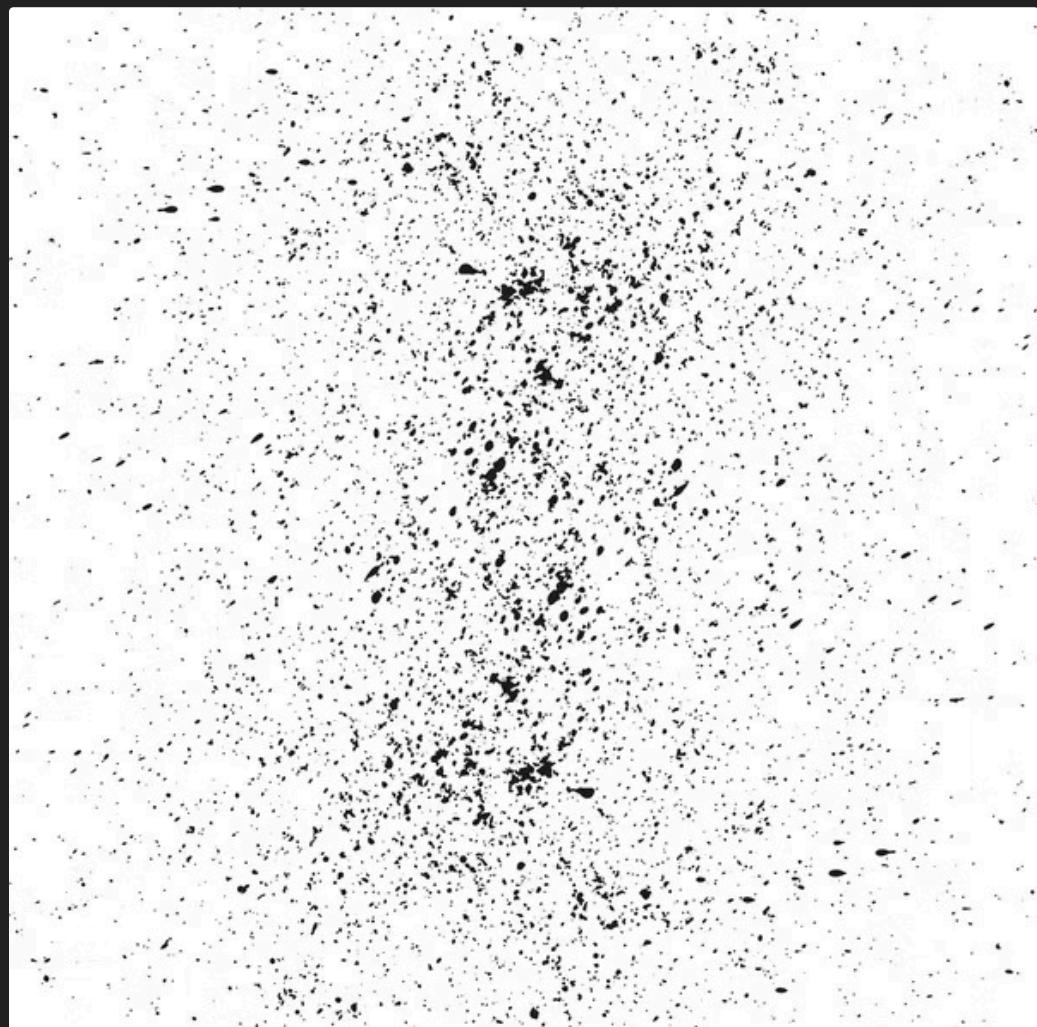


# PSO vs AG: ¿En qué se diferencian?

Aspecto	PSO (Enjambre)	AG (Evolutivo)
Inspiración	Bandadas de aves/peces	Evolución natural
Operadores	Velocidad + posición	Selección + cruza + mutación
Comunicación	Directa (gbest)	Indirecta (fitness)
Memoria	Individual (pbest)	No hay memoria
Espacio natural	Continuo ( $\mathbb{R}^n$ )	Discreto (adaptado a continuo)
Complejidad	Simple	Más compleja

Pregunta central del estudio:

¿Cuál funciona mejor en optimización continua?





# Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO)

## Concepto

- Inspirado en el comportamiento de **parvadas de aves** o cardumen de peces.
- Cada partícula representa una **solución candidata** en el espacio de búsqueda.
- Las partículas se mueven buscando el óptimo, guiadas por:
  - **pbest:** La mejor posición personal que ha encontrado una partícula.
  - **gbest:** La mejor posición global encontrada por cualquier partícula en el enjambre.

## Ecuaciones

### Actualización de velocidad:

$$v(t + 1) = w \cdot v(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (\text{pbest} - x) + c_2 \cdot r_2 \cdot (\text{gbest} - x)$$

### Actualización de posición:

$$x(t + 1) = x(t) + v(t + 1)$$

# Parámetros Clave de PSO

¿Qué cambia el comportamiento?

Parámetro	Función	Impacto
w (inercia)	Mantener dirección	Alta → exploración, Baja → explotación
c <sub>1</sub> (cognitivo)	Atraer a pbest	Alta → búsqueda individual, menor influencia del enjambre
c <sub>2</sub> (social)	Atraer a gbest	Alta → convergencia rápida, mayor influencia del enjambre

Estos parámetros controlan el equilibrio entre la exploración (buscar nuevas áreas) y la explotación (refinar soluciones existentes) del espacio de búsqueda.

# Configuraciones de PSO Probadas

## Variantes Evaluadas

Variante	w	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	Comportamiento
PSO Estándar	0.7	1.5	1.5	 Balanceado: Un equilibrio entre exploración y explotación, que suele ser lo mejor en la mayoría de problemas.
PSO Exploratorio	0.9	0.5	2.5	 Búsqueda global: Prioriza la exploración de nuevas regiones para evitar óptimos locales.
PSO Explotador	0.4	2.5	0.5	 Refinamiento local: Se enfoca en mejorar las soluciones encontradas, convergiendo más rápido.
AG (referencia)	-	-	-	 Cruza + mutación: El algoritmo de referencia basado en la genética genéticos.

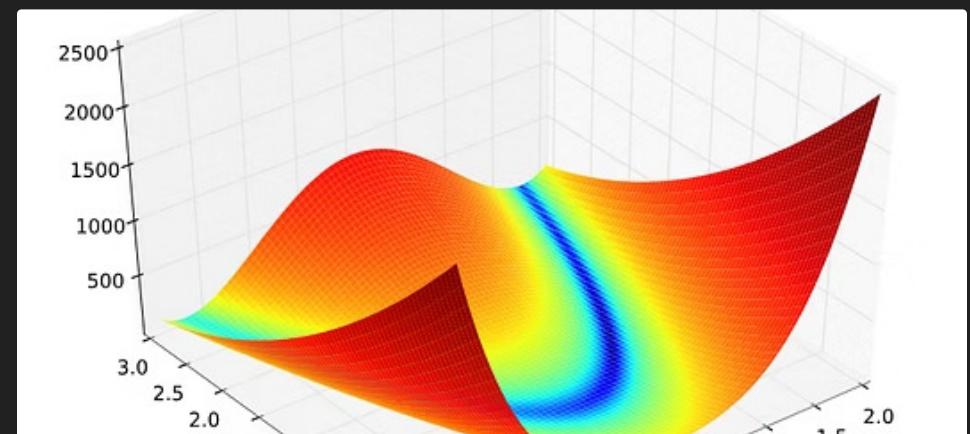
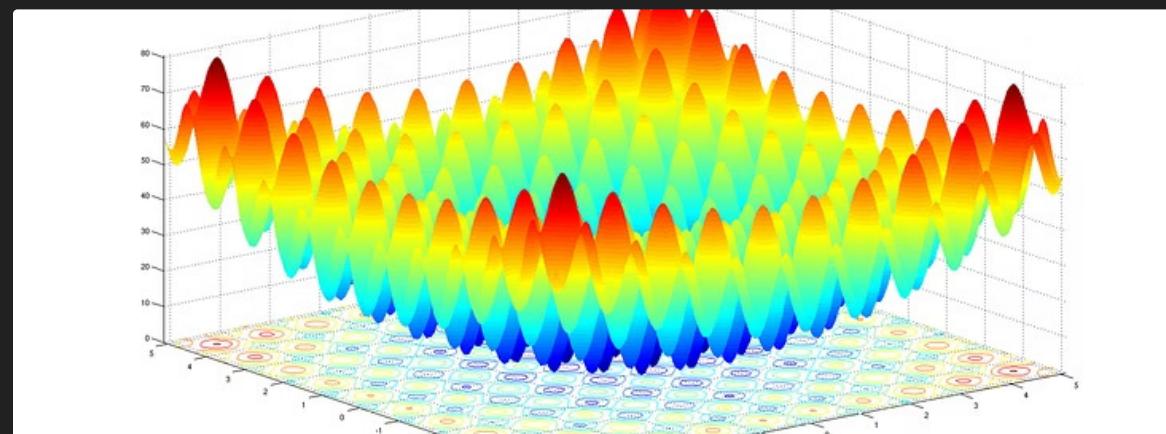
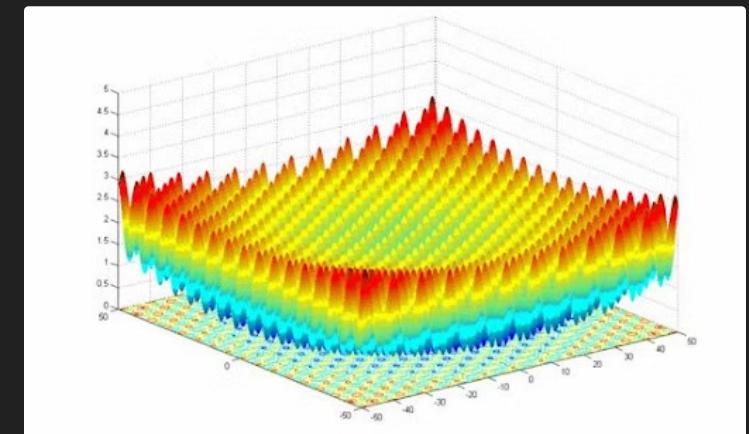
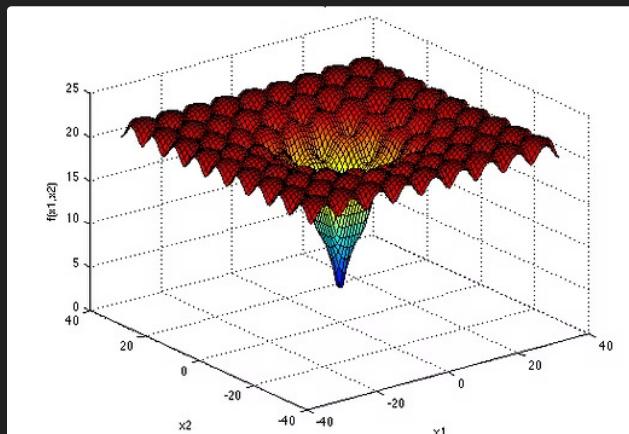
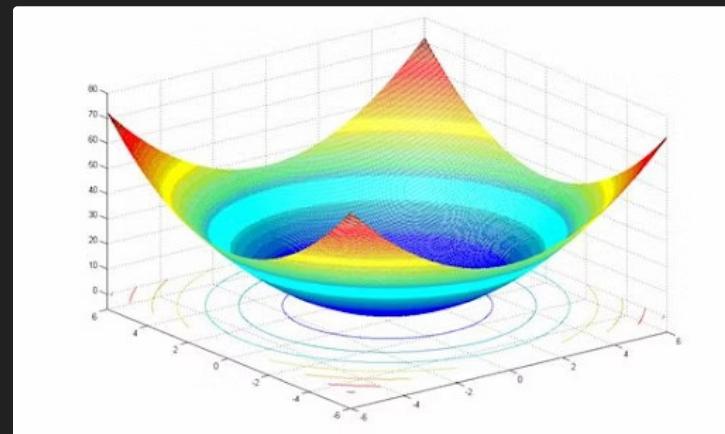
# Metodología Experimental

## Funciones de Prueba

- **✓ Esfera:** Unimodal, fácil de optimizar, ideal para probar la velocidad de convergencia.
- **✓ Rosenbrock:** Multimodal con un valle estrecho, un desafío para la convergencia.
- **✓ Rastrigin:** Multimodal con muchos mínimos locales, se necesita buena capacidad de escape.
- **✓ Ackley:** Muchos óptimos locales y un valle global profundo, prueba la exploración efectiva.
- **✓ Griewank:** Multimodal y compleja, con un comportamiento de ondas que dificulta la búsqueda.

## Protocolo

- **1 2 3 4 Dimensiones:** Evaluamos el rendimiento en espacios de 10 y 30 dimensiones para simular problemas de diferente complejidad.
- **🔁 Repeticiones:** 30 ejecuciones por cada configuración para asegurar la robustez estadística de los resultados.
- **📊 Métricas:** Analizamos el fitness final alcanzado, el tiempo de ejecución y la trayectoria de convergencia.
- **📈 Análisis:** Utilizaremos boxplots para visualizar la distribución de los resultados y rankings para comparar el desempeño global.



# Comportamiento de Convergencia: Rastrigin 10D

El análisis del comportamiento de convergencia nos muestra la diferencia de cada variante que tomamos contra Rastrigin.

- Eje X: Iteraciones (0-100)
  - Eje Y: Mejor fitness (escala logarítmica)
  - 4 líneas: PSO\_estandar, PSO\_exploracion, PSO\_explotacion, AG\_base
- 
-  **PSO Exploración:** Muestra una convergencia lenta pero muy estable. Como se enfoca en exploración le permite sortear los óptimos locales sin estancarse prematuramente.
  -  **PSO Explotador:** Demuestra una rápida convergencia inicial, desciende muy fuerte al principio aunque, su tendencia a la explotación puede llevarlo a estancarse en óptimos locales, lo que resulta en un progreso limitado en iteraciones posteriores.
  -  **PSO Estándar:** Logra un equilibrio óptimo entre exploración y explotación. Su trayectoria de convergencia sugiere que puede escapar de los óptimos locales mientras mantiene un buen ritmo de mejora general.
  -  **AG (Algoritmo Genético):** Exhibe la convergencia más lenta entre todos los algoritmos de PSO. Lo que puede mostrar su mecanismo de búsqueda diferente, que puede ser menos eficiente en funciones continuas como Rastrigin.

# Distribución de Calidad de Soluciones

La calidad de las soluciones encontradas y su variabilidad ofrecen una visión profunda de la robustez de cada algoritmo.

## Esfera (Unimodal): Rendimiento Homogéneo

En la función Esfera, todas las variantes de PSO y AG convergen hacia el óptimo global. La distribución compacta de los boxplots para Esfera 10D quiere decir que hay una alta robustez en este problema relativamente simple.

## Rastrigin (Multimodal): Más cambiante

- **PSO Exploratorio:** Tiene la "caja" más estrecha, lo que marca una mayor robustez y soluciones más consistentes a pesar de la complejidad de Rastrigin. Su capacidad para explorar ampliamente hace que no quedemos atrapados en otras soluciones.
- **AG (Algoritmo Genético):** Muestra la "caja" más ancha, mostrando más diferencia en la calidad de las soluciones. Esto es por ser multimodal y por su dificultad para encontrar soluciones consistentes.

# Ranking por Función: ¿Qué algoritmo es mejor en cada problema?

Esfera	PSO Estándar	PSO Explorador	PSO Exploratorio	AG
Rosenbrock	PSO Explorador	PSO Estándar	PSO Exploratorio	AG
Rastrigin	PSO Exploratorio	PSO Estándar	AG	PSO Explorador
Ackley	PSO Exploratorio	PSO Estándar	AG	PSO Explorador
Griewank	PSO Estándar	PSO Exploratorio	PSO Explorador	AG

## Estadísticas Agregadas por Posición

<b>PSO Estándar</b> 3 primeros lugares 2 segundos lugares	<b>PSO Exploratorio</b> 2 primeros lugares 2 segundos lugares 1 tercer lugar
<b>PSO Explorador</b> 1 primer lugar 1 segundo lugar 2 terceros lugares 1 cuarto lugar	<b>AG</b> 0 primeros lugares 2 terceros lugares 3 cuartos lugares

### Observación Clave

**PSO Exploratorio** se destaca en funciones multimodales complejas. **PSO Explorador** rinde mejor en funciones más suaves y unimodales. **PSO Estándar** ofrece un balance sobresaliente. El **AG** consistentemente se ubica en las últimas posiciones.

# Ranking Promedio: El Veredicto Final

## Resultados 10D

- 🥇 PSO Estándar: 1.8 → Consistentemente en 1° o 2° lugar, demostrando su robustez.
- 🥈 PSO Exploratorio: 1.9 → Muy cerca del estándar, lo que subraya su eficacia en la exploración.
- 🥉 PSO Explotador: 2.3 → Buen desempeño general, pero su enfoque en la explotación lo limita en ciertos escenarios.
- 🟥 AG: 3.2 → Se mantiene en las últimas posiciones, indicando su menor competitividad.

## Resultados 30D

- 🥇 PSO Estándar: 2.0 → Mantiene su liderazgo, probando su escalabilidad.
- 🥈 PSO Exploratorio: 2.2 → Se mantiene competitivo, demostrando adaptabilidad a la alta dimensionalidad.
- 🥉 PSO Explotador: 2.5 → Sufre más con el aumento de dimensionalidad, destacando una limitación en problemas complejos.
- 🆚 AG: 3.3 → Su peor desempeño en alta dimensión refuerza la necesidad de optimizarlo para estos casos.

### ▢ Conclusión Destacada

En promedio, el **PSO Estándar es el claro ganador** en diversas funciones y dimensionalidades. Aunque la elección óptima del algoritmo depende del problema elegido a resolver, especialmente si es multimodal o unimodal.