

## El Problema Multi-Objetivo

Objetivo: Maximizar la producción de maíz y minimizar el consumo de agua en un área de cultivo de 1000 metros cuadrados.

Variables de Decisión (lo que podemos controlar):

1.  $x_1$ : Densidad de siembra (número de plantas por metro cuadrado).
2.  $x_2$ : Cantidad de fertilizante aplicado (kg por metro cuadrado).

Funciones Objetivo (lo que queremos optimizar):

Para este ejemplo, utilizaremos funciones hipotéticas pero realistas que capturen la naturaleza conflictiva de los objetivos:

1. Producción de Maíz (a maximizar): Se asume que la producción aumenta con la densidad de siembra y el fertilizante, pero con rendimientos decrecientes y un punto óptimo a partir del cual el exceso puede ser perjudicial.
  - $\text{Produccion\_por\_m2} = 50 * x_1 + 30 * x_2 - 5 * x_1^2 - 2 * x_2^2$  (en kg de maíz por  $\text{m}^2$ )
  - Función Objetivo 1 (F1):  $\text{Produccion\_Total} = 1000 * \text{Produccion\_por\_m2}$
  - *Nota:* pymoo minimiza por defecto. Para maximizar F1, minimizaremos -F1.
2. Uso de Agua (a minimizar): Se asume que el uso de agua aumenta con la densidad de siembra (más plantas demandan más agua) y con el fertilizante (ya que un crecimiento vigoroso y la lixiviación aumentan la demanda).
  - $\text{Agua\_por\_m2} = 10 * x_1 + 5 * x_2 + x_1^2 + 0.5 * x_2^2$  (en litros por  $\text{m}^2$ )
  - Función Objetivo 2 (F2):  $\text{Agua\_Total} = 1000 * \text{Agua\_por\_m2}$

Restricciones:

- Las variables de decisión tienen límites realistas:
    - $0 \leq x_1 \leq 5$  (plantas/ $\text{m}^2$ )
    - $0 \leq x_2 \leq 1$  (kg fertilizante/ $\text{m}^2$ )
-

## Explicación del Código y los Resultados

### 1. MaizAguaProblema(Problem):

- Definimos nuestra clase de problema herendando de `pymoo.core.problem.Problem`.
- `__init__`: Inicializa el problema con el número de variables (`n_var=2`), el número de objetivos (`n_obj=2`), y los límites inferior (`xl`) y superior (`xu`) para nuestras variables de decisión (`x1`, `x2`). También se almacena el `area_total`.
- `_evaluate(self, X, out, *args, **kwargs)`: Este es el método central donde se calculan los valores de las funciones objetivo para un conjunto dado de soluciones (`X`).
  - `X` es un array NumPy donde cada fila representa una solución (un par de valores (`x1`, `x2`)).
  - Calculamos `produccion_total` y `agua_total` usando nuestras funciones hipotéticas.
  - ¡Importante! pymoo está diseñado para *minimizar* objetivos. Como queremos *maximizar* la producción de maíz, calculamos `f1 = -produccion_total`. Al minimizar un valor negativo, se maximiza el valor original. El uso del agua (`f2`) ya es un objetivo de minimización, por lo que se usa directamente.
  - Los resultados se asignan a `out["F"]` como una matriz donde cada columna es un objetivo y cada fila es una solución.

### 2. Configuración del Algoritmo:

- NSGA2: Elegimos el algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), un algoritmo genético muy popular y robusto para problemas multi-objetivo. `pop_size` define el número de soluciones en cada generación.
- `termination`: Se establece la condición de terminación, en este caso, después de 200 generaciones ("`n_gen`", 200). Esto asegura que el algoritmo tenga suficiente tiempo para converger hacia el Frente de Pareto.

### 3. Ejecución de la Optimización:

- minimize(problem, algorithm, termination, seed=1, verbose=False):  
Esta función ejecuta el algoritmo. seed=1 asegura que los resultados sean reproducibles.

#### 4. Resultados y Visualización:

- res.F: Contiene los valores de las funciones objetivo para todas las soluciones encontradas en la última generación.
- res.X: Contiene los valores de las variables de decisión para esas mismas soluciones.
- Gráfica del Frente de Pareto (Espacio Objetivo):
  - Aquí trazamos -res.F[:, 0] (producción) contra res.F[:, 1] (agua). La producción se vuelve a hacer positiva para la visualización.
  - Cada punto rojo representa una solución no dominada. Esto significa que no hay otra solución tal que sea mejor en *ambos* objetivos. Por ejemplo, si te mueves a la derecha en el gráfico (más producción), irremediablemente tendrás que subir (más agua). Si te mueves hacia abajo (menos agua), tendrás que moverte a la izquierda (menos producción).
  - La curva resultante es el Frente de Pareto. Muestra el *conjunto de compromisos* óptimos entre maximizar la producción y minimizar el agua. Nadie puede lograr más producción con la misma cantidad de agua, ni la misma producción con menos agua, si está en el Frente de Pareto.
  - Se invierte el eje X de la producción para que valores más altos de producción se muestren a la derecha, que es intuitivo.
- Gráfica del Espacio de Diseño:
  - Muestra los valores de x1 (densidad de siembra) y x2 (fertilizante) que corresponden a las soluciones en el Frente de Pareto. Esto es crucial para entender qué decisiones de diseño (cuántas plantas, cuánto fertilizante) conducen a cada punto en el Frente de Pareto.
- Análisis Adicional (x1 y x2 vs Producción):

- Estas gráficas ayudan a visualizar cómo las variables de decisión cambian a medida que nos movemos a lo largo del Frente de Pareto. Puedes observar cómo una mayor producción (moviéndose a la derecha) generalmente requiere mayores valores de  $x_1$  y  $x_2$ .

### Interpretación del Frente de Pareto

El Frente de Pareto te presenta una serie de opciones óptimas para el cultivador. No hay una única "mejor" solución, sino un espectro de ellas, cada una representando un compromiso diferente entre producción y uso de agua:

- Puntos en el extremo superior izquierdo (menos producción, menos agua): Representan estrategias más conservadoras en uso de recursos. Podrían ser soluciones con menor densidad de siembra y/o menos fertilizante.
- Puntos en el extremo inferior derecho (más producción, más agua): Representan estrategias que priorizan la producción a expensas de un mayor consumo hídrico y de fertilizantes. Esto podría implicar densidades de siembra y uso de fertilizantes más altos.
- Puntos intermedios: Ofrecen un equilibrio. Por ejemplo, una solución podría dar una producción "buena" con un uso de agua "razonable", que no es ni la más alta en producción ni la más baja en agua, pero es un equilibrio aceptable para el productor.

La elección de una solución específica del Frente de Pareto depende de las preferencias y prioridades del decisor. Si la conservación del agua es crítica, se elegirá un punto hacia la izquierda-arriba del frente. Si la maximización de la producción es lo más importante, se elegirá un punto hacia la derecha-abajo.