

Introducción a los Algoritmos de Ordenamiento (Sorting)

Dr. Matías Blaña
Astrofísico, Universidad de La Serena

Clase simulada – Postulación Académica 2025

Departamento de Informática
Universidad Técnica Federico Santa María

¿Qué es sorting, y por qué es importante?

Sorting es el proceso de **reorganizar una lista** para que sus elementos queden en un orden definido (creciente, decreciente, alfabético, etc.).

Ejemplo sencillo:

$$[5, 2, 9, 1] \implies [1, 2, 5, 9]$$

El ordenamiento es clave en la informática moderna.

Presente en casi todo sistema que usamos:

- Bases de datos
- Compresores (e.g. ZIP, LZ77)
- Motores de búsqueda y ranking
- Sistemas distribuidos y cómputo masivo

Mensaje clave: Mucho más que estudiar algoritmos aislados — aprender sorting es entender cómo **razonar sobre eficiencia, escalabilidad y arquitectura**.

El punto no es memorizar algoritmos, sino saber elegir el adecuado según el contexto.

¿Cómo elegir el algoritmo adecuado?

No existe el mejor algoritmo. Depende del contexto:

Escenario	Algoritmo recomendado
Datos casi ordenados	Timsort (e.g. Python). Detecta “runs”.
Poca memoria disponible	Heap Sort . No usa memoria extra.
Grandes volúmenes en disco	Merge Sort . Clásico en bases de datos.
Tiempo real en ventanas pequeñas	Insertion Sort . Eficiente para arreglos chicos.
Promedio rápido en memoria RAM	Quick Sort . Excelente localidad de caché.

Idea central: elegir el método según arquitectura, memoria, y distribución de los datos.

Tipos de algoritmos de ordenamiento

- **Simples:** Bubble Sort, Selection Sort, Insertion Sort. (Brute Force).
- **Eficientes:** Merge Sort, Quick Sort, Heap Sort.
- **Especializados:** Counting Sort, Radix Sort, Bucket Sort.
- **Algoritmos avanzados:** Timsort, Bitonic Sort, IntroSort.

¿Cuántos algoritmos existen?

La literatura computacional describe más de **20 algoritmos de ordenamiento clásicos**, y más de **100 variantes y optimizaciones** (según la clasificación de Wikipedia 2025).

Idea general: ordenar comparando, dividiendo o combinando datos.

Ejemplo: Bubble Sort (simple pero secuencial)

Lista inicial a ordenar:

$$A = [\mathbf{5}, \mathbf{1}, 4, 2, 8] \Rightarrow [1, \mathbf{5}, \mathbf{4}, 2, 8] \Rightarrow [1, 4, \mathbf{5}, \mathbf{2}, 8]$$

$$\Rightarrow [1, 5, 4, 2, 8] \Rightarrow [1, 4, \mathbf{5}, \mathbf{2}, 8] \dots$$

Idea: recorrer la lista repetidamente, intercambiando pares de elementos adyacentes mal ordenados.

Y en pseudo código:

```
def bubble_sort(arr):
    n = len(arr)
    for i in range(n):
        for j in range(0, n-i-1):
            if arr[j] > arr[j+1]:
                arr[j], arr[j+1] = arr[j+1], arr[j]
```

Complejidad: Promedio: $O(n^2)$.

Difícil de paralelizar: cada iteración depende del resultado anterior.

Ejemplo: Insertion Sort (bueno para listas pequeñas)

Idea: insertar cada elemento en su posición correcta dentro de la parte ya ordenada.

$$\begin{aligned} A = [5, 1, 4, 2, 8, 2] &\Rightarrow [1, 5, 4, 2, 8, 2] \Rightarrow [1, 4, 5, 2, 8, 2] \\ &\Rightarrow [1, 4, 2, 5, 8, 2] \Rightarrow [1, 2, 4, 5, 8, 2] \Rightarrow [1, 2, 4, 5, 8, 2] \dots \end{aligned}$$

```
def insertion_sort(arr):  
    for i in range(1, len(arr)):  
        key = arr[i]  
        j = i-1  
        while j >= 0 and key < arr[j]:  
            arr[j+1] = arr[j]  
            j -= 1  
        arr[j+1] = key
```

Complejidad: $O(n^2)$, pero eficiente para listas cortas o casi ordenadas.

Difícil de paralelizar: la inserción depende del orden previo.

Ejemplo: Merge Sort

$$A = [5, 1, 4, 2, 8]$$

Idea:

- Dividir la lista en mitades.
- Ordenar cada mitad recursivamente.
- Combinar (merge) las mitades ordenadas.

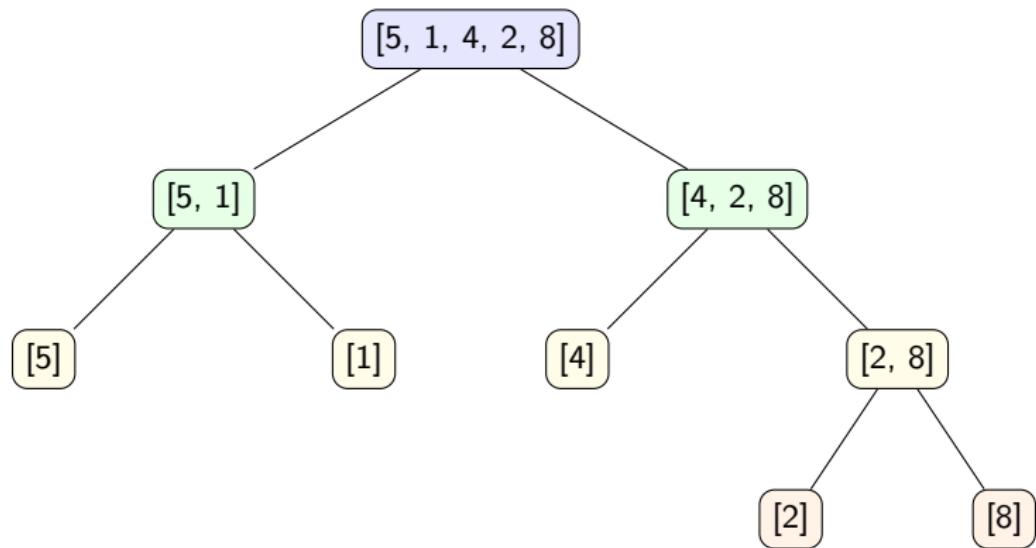
Complejidad: $O(n \log n)$ (constante).

Paralelización natural: cada mitad puede procesarse en distintos hilos o núcleos.

Ejemplo: Merge Sort

Ejemplo visual:

$$A = [5, 1, 4, 2, 8]$$



Fusión final: $[5, 1] \rightarrow [1, 5]$, $[2, 8] \rightarrow [2, 8]$, $[1, 5] \cup [4] \cup [2, 8] \rightarrow [1, 2, 4, 5, 8]$

Ejemplo: Timsort, un algoritmo híbrido moderno

Idea principal: Combina las ventajas de **Merge Sort** y **Insertion Sort**. Diseñado por *Tim Peters* (2002) para Python y Java.

Estrategia:

- ① Divide el arreglo en segmentos pequeños llamados **runs**.
- ② Cada run se ordena con **Insertion Sort**.
- ③ Luego se combinan los runs con **Merge Sort**.

Ventajas:

- Detecta secuencias ya ordenadas (*natural runs*).
- Muy eficiente para datos parcialmente ordenados.
- Estable y con complejidad garantizada: $O(n \log n)$.

Uso actual: Timsort es el método por defecto en `sorted()` y `list.sort()` en Python.

Ejemplo: QuickSort in-place: idea general

QuickSort in-place reordena el arreglo dentro del mismo arreglo, sin crear listas nuevas.

$$A = [5, 1, 4, 2, 8], \quad p = 4$$

Pasos principales:

- ① Elegir un pivote (aquí usamos el valor **4**).
- ② Usar dos punteros:
 - ▶ i avanza desde la izquierda buscando valores **mayores** al pivote.
 - ▶ j retrocede desde la derecha buscando valores **menores** al pivote.
- ③ Cuando $i < j$, se realiza un **swap**.
- ④ Al terminar: el pivote queda en su posición final y el arreglo queda dividido en:

menores | pivote | mayores

Ventaja clave: usa menos memoria y es muy rápido en práctica.

QuickSort in-place: partición con i y j

Arreglo inicial:

$$A = [5, 1, 4, 2, 8], \quad p = 4$$

- ① i avanza (\rightarrow) hasta encontrar un valor > 4 :

5, 1, 4, 2, 8

- ② j retrocede (\leftarrow) hasta encontrar un valor < 4 :

5, 1, 4, 2, 8

- ③ Cuando $i < j$, se intercambian:

$$A \Rightarrow [2, 1, 4, 5, 8]$$

- ④ i avanza nuevamente:

2, 1, 4, 5, 8

i llega al pivote \Rightarrow STOP.

Resultado de la partición:

$$[2, 1] | [4] | [5, 8]$$

QuickSort in-place: resultado de la partición

Después de la fase de partición:

$$A = [2, 1] | [4] | [5, 8]$$

El pivote (4) está en su posición definitiva.

Ahora QuickSort se aplica recursivamente a cada lado:

$$\text{QuickSort}([2, 1]) \Rightarrow [1, 2]$$

$$\text{QuickSort}([5, 8]) \Rightarrow [5, 8]$$

Lista final ordenada:

$$[1, 2, 4, 5, 8]$$

Ventajas:

- In-place: menos uso de memoria.
- Eficiente en promedio: $O(n \log n)$.

Nota: pseudocódigo en el Apéndice 23

Complejidad: ¿Qué significa realmente $O(n)$, $O(n^2)$, $O(n \log n)$?

La notación Big-O describe cómo crece el número de operaciones que realiza un algoritmo cuando el tamaño del arreglo n aumenta.

- $O(n)$: el número de operaciones crece linealmente con n .
- $O(n^2)$: si duplico n ($2n$), el trabajo se multiplica por **4**.
- $O(n \log n)$: crece más rápido que lineal, pero mucho más lento que cuadrático.

Ejemplo: Bubble Sort, tiene dos ciclos anidados

$$\text{operaciones} \propto n \times n = n^2$$

Por eso decimos que su complejidad es $O(n^2)$.

Importante:

- Big-O describe operaciones abstractas (comparaciones, asignaciones...)
- El tiempo real depende además de CPU, caché, implementación, etc.
- Pero ambos están directamente relacionados: más operaciones → más tiempo.

Complejidad empírica: número de operaciones

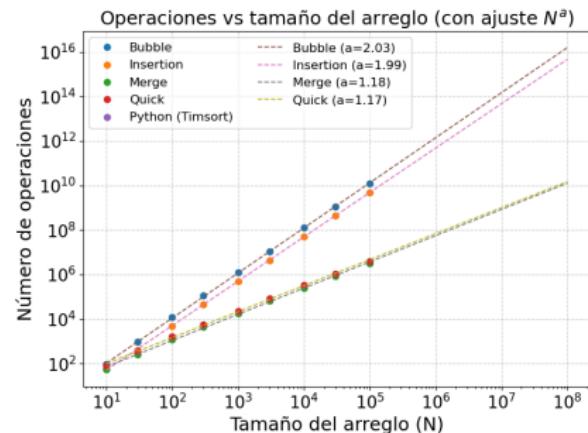
Objetivo: medir cómo crece la cantidad total de operaciones (comparaciones + asignaciones) al aumentar el tamaño del arreglo N .

Modelo ajustado:

$$\log(\text{ops}) = a \log(N) + C \quad \Rightarrow \quad \text{ops} \propto N^a$$

Interpretación:

- Bubble/Insertion: exponentes $a \approx 2$ (cuadráticos).
- Merge/Quick: $a \sim 1-1.2$, consistente con $O(n \log n)$.
- El ajuste empírico reproduce fielmente la teoría.
- La extrapolación a $N = 10^7 - 10^8$ permite estimar el costo real.



Número de operaciones vs tamaño del arreglo, con ajuste N^a .

Nota: Timsort no se muestra en operaciones porque no es accesible desde Python para instrumentación, pero sí aparece en los gráficos de tiempo.

Complejidad, eficiencia y tiempo de cómputo

La complejidad también dependerá del ordenamiento inicial de los arreglos. Esto significa que se debe seleccionar el algoritmo más óptimo o eficiente **dependiendo del problema en particular y de los recursos disponibles.**

Algoritmo	Mejor	Promedio	Peor
Bubble / Insertion	$O(n)$	$O(n^2)$	$O(n^2)$
Merge Sort	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$
Quick Sort	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$	$O(n^2)$
Heap Sort	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$
Timsort	$O(n)$	$O(n \log n)$	$O(n \log n)$

Complejidad, eficiencia y tiempo de cómputo

Objetivo: conectar la teoría de complejidad con el tiempo real de ejecución.

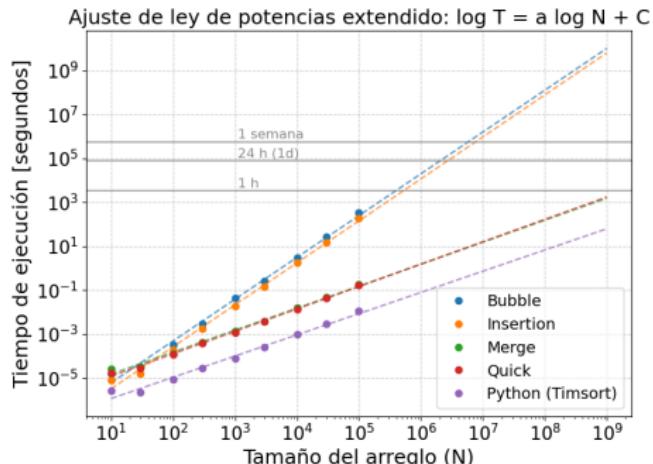
Modelo de ajuste:

$$\log T = a \log N + C \quad \Rightarrow \quad T \propto N^a$$

Resultados:

- Los algoritmos eficientes (**Merge**, **Quick**, **Timsort**) siguen $a \approx 1.0 - 1.2$.
- La extrapolación muestra el crecimiento del tiempo hasta semanas para $N \sim 10^8$.
- Diferencias pequeñas en a implican grandes variaciones en tiempo real.

Conclusión: La complejidad asintótica ($O(n^2)$, $O(n \log n)$) predice la tendencia, pero el rendimiento real depende de constantes, cache, y paralelización.



Escalamiento temporal y eficiencia de algoritmos de ordenamiento. Test in 1CPU Apple M1 Pro, python Python 3.13.5

¿Cuáles algoritmos se pueden paralelizar?

Algoritmo	Paralelizable	Comentarios
Bubble / Insertion	✗	Iterativos, dependencias secuenciales
Merge Sort	✓	Cada mitad es independiente
Quick Sort	✓	Cada sublistas se procesa en paralelo
Heap Sort	△	Parcialmente (construcción del heap)
Counting / Radix	✓	Ideal para GPU / procesamiento masivo

Conclusión: Los métodos de *divide y conquista* escalan mejor en arquitecturas paralelas.

Comparación de algoritmos

Algoritmo	Promedio	Memoria	Paralelizable
Bubble / Insertion	$O(n^2)$	Baja	✗
Merge Sort	$O(n \log n)$	Alta	✓
Quick Sort	$O(n \log n)$	Media	✓
Heap Sort	$O(n \log n)$	Baja	△

En práctica: QuickSort es el estándar en librerías (C, Python, C++) por su eficiencia promedio.

Sorting en aplicaciones reales de alto rendimiento

Aplicaciones: En cómputo científico y análisis de datos masivos:

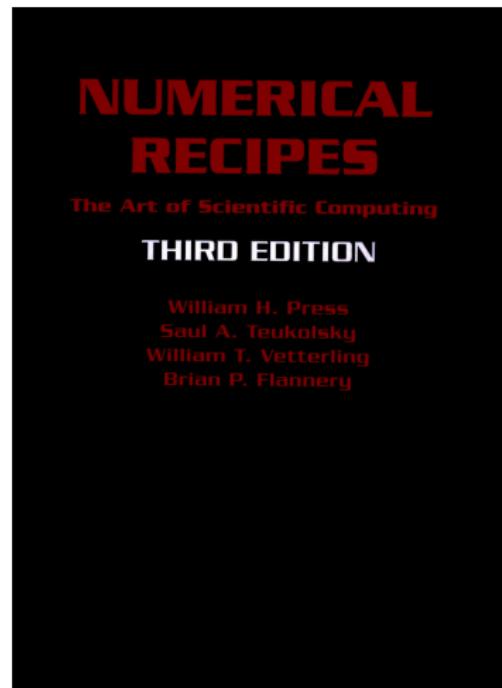
- Ordenar catálogos astronómicos de millones de objetos
- Preparar datos para análisis en paralelo (MPI, GPU)
- Agrupar y clasificar datos multidimensionales
- Pre-procesamiento para algoritmos de clustering y ML

En la práctica: Elegir entre $O(n^2)$ y $O(n \log n)$ no es académico: puede significar **segundos vs horas o horas vs días.**

Mi experiencia: en proyectos de simulación y análisis astronómico, optimizar el sorting reduce el tiempo de pipelines completos.

Bibliografía y recursos recomendados

-  Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009).
Introduction to Algorithms (3rd ed.). MIT Press.
-  Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007).
Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (3rd ed.).
Cambridge University Press.
-  Sedgewick, R., & Wayne, K. (2011).
Algorithms (4th ed.). Addison-Wesley.
-  Wikipedia contributors. (2025).
Sorting algorithm. Recuperado de
https://en.wikipedia.org/wiki/Sorting_algorithm
-  GeeksforGeeks. (2025).
Sorting Algorithms Tutorials. Recuperado de
<https://www.geeksforgeeks.org/sorting-algorithms/>

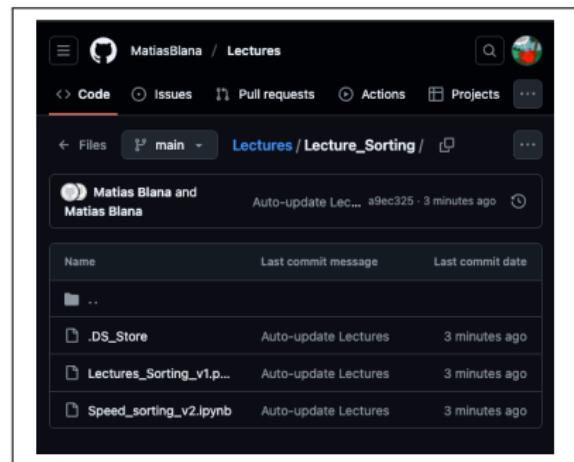


Portada de *Numerical Recipes* (3rd Ed., 2007)

Material de la clase de Sorting

Repositorio del curso:

- Slides en PDF
- Scripts de benchmark (Python)
- Figuras y gráficos
- Ejemplos de algoritmos (Bubble, Merge, Quick, Timsort)



Disponible en GitHub:

Captura del repositorio en GitHub

<https://github.com/MatiasBlana/Lectures/tree/main/LectureSorting>

El ordenamiento no es un fin, sino una herramienta.

- Los algoritmos de sorting ilustran cómo razonar sobre **eficiencia, escalabilidad y arquitectura**.
- La complejidad teórica ($O(n^2)$, $O(n \log n)$) se refleja directamente en el rendimiento real, como vimos en los benchmarks.
- Cada algoritmo es óptimo en distintos contextos: memoria limitada, datos parcialmente ordenados, GPU, grandes volúmenes en disco, o sistemas distribuidos.
- Timsort es un ejemplo moderno de ingeniería algorítmica: híbrido, estable, adaptativo y usado en varios lenguajes (e.g. Python).
- Entender estas ideas permite construir sistemas más rápidos, eficientes y robustos.

Muchas gracias.

*Material y código disponible en GitHub.

Apéndice: QuickSort in-place: pseudocódigo clásico

QuickSort aplica: partición → recursión → concatenación implícita

```
function quicksort(A, low, high):
    if low < high:
        p = partition(A, low, high)
        quicksort(A, low, p)
        quicksort(A, p+1, high)
```

Partición in-place (Hoare) para el ejemplo con pivote = 4:

```
function partition(A, low, high):
    pivot = A[low]      # = 4
    i = low - 1
    j = high + 1

    while true:
        repeat:
            i = i + 1
        until A[i] >= pivot

        repeat:
            j = j - 1
        until A[j] <= pivot

        if i >= j:
            return j

        swap(A[i], A[j])
```