

Búsquedas informadas

Verónica E. Arriola-Rios

Facultad de Ciencias, UNAM

17 de septiembre de 2025



Antecedentes

- 1 Antecedentes
- 2 Definiciones
- 3 Diseño de heurísticas
- 4 Algoritmos de búsqueda local
- 5 Búsqueda primero el mejor

Temas

- 1 Antecedentes
 - Complejidad

Búsquedas ciegas

Tabla: Evaluación de estrategias de búsqueda.

Criterio	Primero en amplitud	Costo uniforme	Primero en profundidad	Profundidad limitada	Profundidad iterativa	Bidireccional (si aplicable)
¿Completa?	Sí ^a	Sí ^{a,b}	No ^{a2}	No	Sí ^a	Sí ^{a,d}
Tiempo	$O(b^{d+1})$	$O(b^{C^*/\epsilon})$	$O(b^m)$	$O(b^l)$	$O(b^d)$	$O(b^{d/2})$
Espacio	$O(b^{d+1})$	$O(b^{C^*/\epsilon})$	$O(bm)$	$O(bl)$	$O(bd)$	$O(b^{d/2})$
¿Óptima?	Sí ^c	Sí	No	No	Sí ^c	Sí ^{c,d}

b

Factor de ramificación

d

Profundidad de la solución más cercana a la raíz

m

Máxima profundidad del árbol de búsqueda, puede ser ∞

l

Límite impuesto a la profundidad

a

Completa si b es finito

b

Completa si el costo por un paso es $\geq \epsilon > 0$

c

Óptima si todos los costos son idénticos

d

Si ambas direcciones utilizan búsqueda en amplitud

Definiciones

- 1 Antecedentes
- 2 Definiciones
- 3 Diseño de heurísticas
- 4 Algoritmos de búsqueda local
- 5 Búsqueda primero el mejor

Temas

2 Definiciones

- Heurística
- Heurística admisible
- Heurística consistente

Función heurística

Definición

- Una **función heurística** $h(n)$, $h : S \rightarrow \mathbb{R}$ donde S es el espacio de estados, es el costo **estimado** del camino más barato desde el nodo n a un nodo objetivo.
- Evidentemente, si n es un nodo meta $h(n) = 0$.

Temas

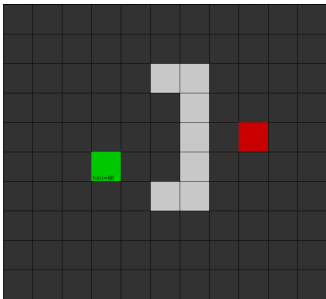
2 Definiciones

- Heurística
- Heurística admisible
- Heurística consistente

Heurística admisible

Definición

Una **heurística admisible** es aquella que nunca sobrestima el costo de alcanzar un objetivo.



Posibles heurísticas: Ignorando los obstáculos.

- *Línea recta*

$$d = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2}$$

- *Distancia Manhattan*

$$d = |x_f - x_i| + |y_f - y_i|$$

no es admisible.

TIP: *Admisible* → *optimista*.

Temas

2 Definiciones

- Heurística
- Heurística admisible
- Heurística consistente

Heurística consistente

Definición

Una heurística es **consistente** o **monótona** si para cada nodo n y cada sucesor n' de n generado por cualquier acción a :

$$h(n) \leq c(n, a, n') + h(n') \quad (1)$$

donde $c(n, a, n')$ es el costo de alcanzar el objetivo desde n pasando por n' .

Si $h(n)$ es consistente, entonces los valores de $f(n)$, a lo largo de cualquier camino, no disminuyen.

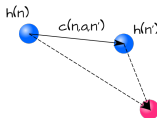
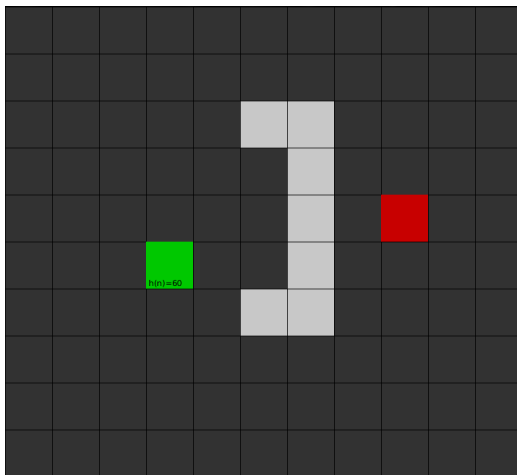


Figura: **TIP:** *Consistente* → *desigualdad del triángulo*.

Mapa en rejilla



Posibles heurísticas: Ignorando los obstáculos.

- *Línea recta*

$$d = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2}$$

- *Distancia Manhattan*

$$d = |x_f - x_i| + |y_f - y_i|$$

Ambas heurísticas son consistentes.

Diseño de heurísticas

- 1 Antecedentes
- 2 Definiciones
- 3 Diseño de heurísticas**
- 4 Algoritmos de búsqueda local
- 5 Búsqueda primero el mejor

Temas

- 3 Diseño de heurísticas
 - Técnica
 - Ejemplo

Diseño de heurísticas

- Para diseñar una heurística se pueden seguir los siguientes pasos:
 - ➊ Simplificar el problema reduciendo las restricciones (**problema relajado**).
 - ➋ Calcular el costo de resolver el problema relajado.
 - ➌ El costo de una solución óptima en un problema relajado es una heurística admisible y consistente para el problema original.
- Al probar diferentes combinaciones de restricciones eliminadas se pueden obtener heurísticas distintas.

Temas

3 Diseño de heurísticas

- Técnica
- Ejemplo

Ejemplo: Tablillas deslizantes de 8×8

La regla de transición es:

“Una tablilla se puede mover del cuadro A al cuadro B si A es horizontal o verticalmente adyacente a B y B está vacío”.

Las condiciones simplificadas eliminan alguna o ambas restricciones:

Una tablilla se puede mover del cuadro A al cuadro B si:

- 1 A es horizontal o verticalmente adyacente a B (distancia Manhattan).
- 2 B está vacío (tablillas en el lugar equivocado: puedo teletransportar la tablilla que va en el hueco).
- 3 *siempre* (tablillas en el lugar equivocado).



Figura: Tablero para el juego de las tablillas deslizantes.

- $h(n)$ = suma de las distancias de las piezas a sus posiciones objetivo. A la suma de las distancias horizontales y verticales se le llama **distancia en la ciudad** o **distancia Manhattan**.
- $h(n)$ = número de piezas mal colocadas.



Figura: Las heurísticas ofrecen un estimado de la distancia entre el estado actual y la meta.

Algoritmos de búsqueda local

- 1 Antecedentes
- 2 Definiciones
- 3 Diseño de heurísticas
- 4 Algoritmos de búsqueda local**
- 5 Búsqueda primero el mejor

Temas

- 4 Algoritmos de búsqueda local
 - Características
 - Ascenso/descenso de colinas
 - Recocido simulado

Algoritmos de búsqueda local

- Los algoritmos de **búsqueda local** funcionan con un sólo **estado actual** y
- generalmente se mueve sólo a los vecinos del estado;
- el camino seguido para encontrar la solución es irrelevante y es olvidado.
- Cada estado tiene un valor asociado dado por una **función objetivo**,
- el objetivo del algoritmo es encontrar el estado con el mejor valor.

Temas

- 4 Algoritmos de búsqueda local
 - Características
 - Ascenso/descenso de colinas
 - Recocido simulado

Ascenso/descenso de colinas

Búsqueda local voraz

- Siempre se mueve cuesta arriba guiado por el valor de la heurística.
- La función de evaluación de un nodo n es $f(n) = h(n)$.
- No tiene memoria y termina cuando no hay vecinos con un mejor valor.
- Si más de un valor sucesor tiene el valor óptimo, elige uno al azar.
- Cuando funciona, es el más eficiente tanto en tiempo como en espacio.

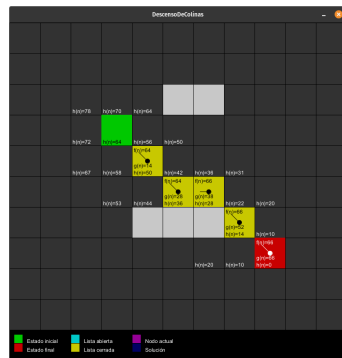


Figura: Descenso de colinas es un algoritmo voraz.

Desventajas

- Se atasca en máximos locales por lo que puede fallar en encontrar un máximo global.
- Le cuesta trabajo caminar sobre crestas (sucesión de máximos locales desconectados).
- No sabe cómo elegir un camino en una meseta.

Por ejemplo se puede aplicar al problema de las reinas con la heurística $h =$ número de pares de reinas que se atacan la una a la otra.

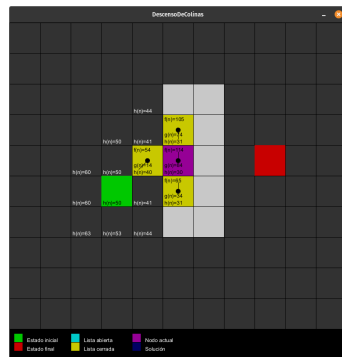


Figura: Descenso de colinas se atora en los mínimos locales.

Temas

4 Algoritmos de búsqueda local

- Características
- Ascenso/descenso de colinas
- **Recocido simulado**

Recocido

“El recocido es un proceso de tratamiento térmico utilizado para reducir la dureza, aumentar la flexibilidad (ductilidad) y ayudar a eliminar las tensiones internas creadas en el metal durante el temple.”

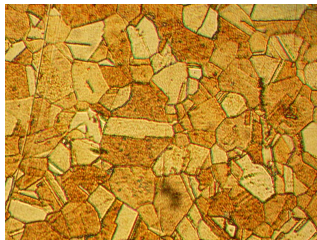


Figura: Izquierda: Horno para recocido. Derecha: Microestructura de latón recocida.

Fuentes:

- <https://www.bodycote.com/es/servicios/tratamiento-termico/annealing-normalising/recocido/>
- <https://www.templeindustrialesalcala.es/recocido/>
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Microstructure_of_rolled_and_annealed_brass;magnification_400X.jpg
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Annealing_furnace_Saltford_Brass_Mill.jpg

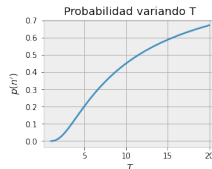
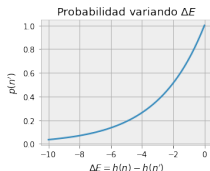
Recocido simulado *Simulated annealing*

- Es similar al **ascenso** de colinas, pero en vez de escojer siempre el mejor movimiento, hace una elección aleatoria.
- Al inicio, puede aceptar movimientos con peores calificaciones, pero esta probabilidad disminuye con el tiempo, conforme se decrementa la temperatura T .

$$p(n') = e^{\frac{\Delta E}{T}}$$

$$\Delta E = h(n') - h(n)$$

donde $p(n')$ determina la probabilidad de elegir al estado n' cuando su valor $h(n')$ es menor que el que se tenía en n .



Algoritmo

Algorithm Recocido simulado

- 1: **while** $h(n) > \varepsilon$ **do**
 - 2: Elige a un vecino n' **al azar**.
 - 3: **if** $h(n')$ es un mejor estado **then**
 - 4: $n \leftarrow n'$ ▷ Se mueve a n'
 - 5: **else** ▷ n' no es un mejor estado
 - 6: $\Delta E < 0 \Rightarrow$ decidir con probabilidad $p(n')$ si se mueve a ese estado.
-

Para realizar un **descenso** basta con redefinir:

$$\Delta E = h(n) - h(n')$$

Búsqueda primero el mejor

- 1 Antecedentes
- 2 Definiciones
- 3 Diseño de heurísticas
- 4 Algoritmos de búsqueda local
- 5 Búsqueda primero el mejor

Temas

- 5 Búsqueda primero el mejor
 - Descripción general
 - Búsquedas ciegas
 - Búsqueda con heurísticas

Búsqueda primero el mejor

Búsqueda primero el mejor se refiere a una familia de algoritmos que busca expandir siempre **al mejor candidato**.

- Utilizan una *función de evaluación* que define la estrategia de selección.

$$f : S \rightarrow \mathbb{R} \quad (2)$$

- f puede utilizar a la función heurística.
- Un ejemplo es el *costo total estimado* $f(n)$:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (3)$$

Donde $g(n)$ es el costo actual de llegar desde el nodo inicial al nodo n y $h(n)$, el valor de la heurística para el nodo n .

Temas

- 5 Búsqueda primero el mejor
 - Descripción general
 - Búsquedas ciegas
 - Búsqueda con heurísticas

Búsqueda en amplitud (ciega)

Si el costo de las acciones es uniforme, o sólo importa obtener la solución con el menor número de acciones, sea:

$$f(n) = g(n) \quad (4)$$

con $g(n)$ el número de pasos, entonces *búsqueda en amplitud* nos dará la mejor solución.

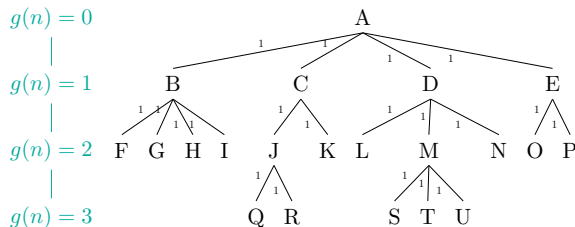


Figura: Amplitud encuentra primero la solución más cercana a la raíz.

Costo uniforme (ciega)

Si las acciones tienen un costo distinto, sea $g(n)$ el costo acumulado desde el nodo inicial hasta el nodo actual.

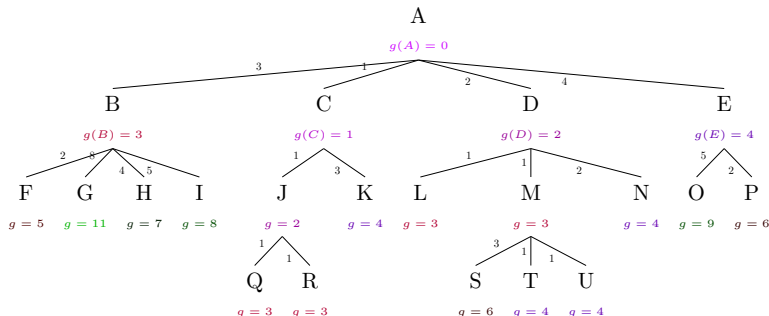


Figura: Trazar curvas de nivel usando el costo acumulado $g(n)$ muestra cómo son visitados los nodos por *Costo uniforme*.

Temas

- 5 Búsqueda primero el mejor
 - Descripción general
 - Búsquedas ciegas
 - Búsqueda con heurísticas

A*

- A^* es el algoritmo de búsqueda primero el mejor que, aún siendo completo, garantiza utilizar la menor cantidad posible de recursos tanto en memoria como en tiempo si la heurística utilizada es **admisible** y **consistente**.
- Luego entonces, la eficiencia final dependerá de la eficiencia de la heurística.

Cómo programar A*

Se sugiere utilizar las estructuras siguientes:

- La *lista abierta* debe ser una **cola de prioridades**.
- La *lista cerrada* puede ser una **tabla hash**.
- Un *Nodo* que contenga los elementos siguientes:
 - *Estado*. La representación de un estado en el espacio de estados.
 - *Nodo padre*. Una referencia a su nodo predecesor inmediato en el árbol de búsqueda.
 - *Acción*. La acción que, al realizarse en el estado del nodo padre produce el estado de este nodo.
 - *Costo del camino*. El costo total del camino que lleva a este nodo.
 - *Profundidad*. La profundidad de este nodo en el árbol de búsqueda.

Algoritmo

Algorithm A*

▷ La lista abierta es una cola de prioridades sobre $f(n)$

```
1: listaAbierta ← nodo inicial
2: mejorSolución ← ∅
3: repeat
4:   nodoActual ← listaAbierta.pop()
5:   listaCerrada ← nodoActual
6:   if objetivo(nodoActual) then
7:     if  $F(\text{nodoActual}) \leq F(\text{listaAbierta.peek()})$  then return nodoActual
8:     else if  $F(\text{nodoActual}) \leq F(\text{mejorSolución})$  then mejorSolución ← nodoActual
9:   for all n vecino de nodoActual do
10:    if  $n \notin \text{listaCerrada}$  then
11:      if  $n \notin \text{listaAbierta}$  then
12:        padre(n) ← nodoActual
13:         $n \leftarrow F, G, H$ 
14:        listaAbierta ← n
15:      else if  $G(n) < n.G_{\text{anterior}}$  then
16:        padre(n) ← nodoActual
17:         $n \leftarrow F, G$ 
18:        reordenar(listaAbierta)
19: until openList = ∅
20: return Fallo
```

Propiedades de A*: Optimalidad

- Si $h(n)$ es admisible entonces $f(n)$ nunca sobre-estima el costo verdadero de una solución que pasa por n .

Teorema

A utilizado como búsqueda en un árbol es óptimo si la heurística $h(n)$ es admisible.*

Es decir, está garantizado que A* encontrará el camino más corto entre el nodo inicial y un nodo meta.

A* con y sin heurística admisible

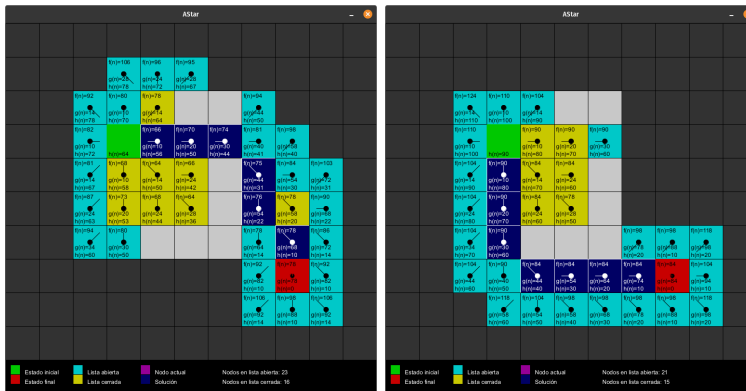


Figura: La optimalidad de la ruta depende de que la heurística sea admisible. **Izquierda:** heurística admisible, costo final = 78. **Derecha:** heurística no admisible, costo final = 84.

Propiedades de A*: Completez

- A* es completo. Si existe una solución, A* la encontrará.

Definición

Un **contorno** es un conjunto de estados que pueden ser alcanzados con un cierto costo.

- Para poder dibujar un contorno es necesario que f sea creciente.
- A* comienza en el nodo inicial, donde el valor de $f(n)$ es mínimo.
- Cada nodo expandido tiene valores de $f(n+1) \geq f(n)$, visitando primero a los que tienen valores más pequeños.
- Por lo tanto se visita a todos los nodos en un contorno antes de proceder al siguiente.
- Esto es una sucesión creciente, si existe una solución a una distancia finita d , eventualmente $f(n) = d$ y encontrará ese nodo.

Propiedades de A*: Eficiencia óptima

- A* es *optimamente eficiente* en términos del número de nodos expandidos dada una función heurística concreta: está garantizado que ningún otro algoritmo óptimo expandirá menos nodos que A*.
- Cualquier algoritmo que no expanda a todos los nodos con $f(n) < C^*$, donde C^* es el valor del camino óptimo, corre el riesgo de pasar de largo la solución óptima.




Propiedades de A*: Requerimientos de espacio

Sin embargo, en términos de espacio, A* consume bastante:

- El peor caso en A* tiene complejidad en tiempo y espacio de $O(b^l)$, donde b es el factor de ramificación^[1] y l es la longitud del camino a la meta más cercana. Esto es crecimiento exponencial.
- Frecuentemente la frontera crece exponencialmente.

^[1]El número promedio de sucesores por nodo.

Referencias I

-  Ghallab, Malik, Dana Nau y Paolo Traverso (2004). *Automated Planning, Theory and Practice*. Morgan Kaufmann Publishers.
-  Lester, Patrick (jul. de 2005). *A* Pathfinding for Beginners*. URL: <http://homepages.abdn.ac.uk/f.guerin/pages/teaching/CS1013/practicals/aStarTutorial.htm>.
-  Russell, Stuart y Peter Norving (2010). *Artificial Intelligence, A Modern Approach*. Ed. por Michael Hirsch. 2a. Pearson Prentice Hall.

Licencia

Creative Commons
Atribución-No Comercial-Compartir Igual

