Heurística - Smart Astronaut

John Jaider Ramos Gaviria[1] and Kevin Ariel Ramírez Amaya[2]

[1]Universidad del Valle
[2]Facultad de Ingeniería
[3]Escuela de Ingeniería de Sistemas y Computación

Octubre de 2025

Contexto del Problema

El problema abordado consiste en el desplazamiento de un agente (astronauta) dentro de un entorno bidimensional discreto de tamaño 10×10. El agente debe recolectar un conjunto de muestras científicas distribuidas en el mapa, evitando obstáculos y gestionando los costos de desplazamiento asociados a distintos tipos de terreno. Adicionalmente, el agente puede utilizar una nave espacial que le permite desplazarse con un costo reducido durante un número limitado de movimientos.

El entorno incluye los siguientes tipos de casillas:

Valor	**Tipo de casilla**	**Costo de movimiento**
0	Casilla libre	1
1	Obstáculo / muro	– (no transitable)
2	Astronauta (inicio)	–
3	Terreno rocoso	3
4	Terreno volcánico	5
5	Nave espacial	0,5 – (hasta agotar combustible)
6	Muestra científica	– (meta parcial)

1. Heurística Utilizada

En la implementación de los algoritmos de búsqueda informada (A* y Búsqueda Ávara) se empleó una heurística diseñada para adaptarse a la naturaleza del problema planteado, donde un agente debe desplazarse en un entorno con diferentes costos de movimiento y con la opción de utilizar una nave para reducir dichos costos.

La heurística definida estima el costo restante desde la posición actual del agente hasta la muestra más cercana, considerando dos posibles rutas de desplazamiento:

$$h(n) = \min_{m \in M} \Big(d(a, m),\ d(a, \text{nave}) + 0{,}5 \cdot d(\text{nave}, m) \Big)$$

donde:

- a representa la posición actual del astronauta.
- nave corresponde a la posición de la nave espacial.
- m es la posición de una muestra pendiente de recolección.
- M es el conjunto de muestras restantes.
- $d(x, y)$ representa la distancia de Manhattan entre las coordenadas x e y:

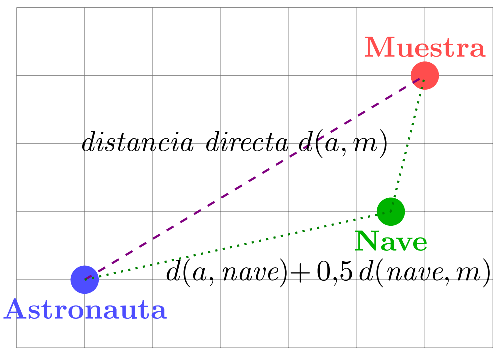
$$d(x, y) = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2|$$

Esta formulación busca reflejar de forma realista el comportamiento del agente: si el astronauta se encuentra cerca de una muestra, la heurística toma la distancia directa; pero si resulta más conveniente utilizar la nave (por la reducción de costo que ofrece), la heurística considera el trayecto hacia la nave más la distancia desde la nave a la muestra, ponderada por el factor de ahorro de combustible (0,5).

El uso de la distancia Manhattan resulta adecuado, dado que los movimientos permitidos son únicamente en las cuatro direcciones cardinales (norte, sur, este y oeste), sin desplazamientos diagonales. Además, esta fue la medida usada en el curso durante toda esta etapa del desarrollo del propio.

Representación Gráfica de la Heurística

La siguiente figura ilustra la relación entre el astronauta, la nave y una muestra. Se muestran las dos rutas que la heurística evalúa: la ruta directa hacia la muestra y la ruta que pasa primero por la nave.



2. Justificación de la Admisibilidad de la Heurística

Una heurística es admisible si nunca sobreestima el costo real del camino más corto desde el estado actual hasta la meta. En este caso, la función $h(n)$ cumple con dicha condición debido a las siguientes razones:

1. **Subestima los obstáculos:** La heurística calcula el costo suponiendo un entorno ideal sin obstáculos, es decir, utiliza la distancia Manhattan mínima posible entre dos puntos. En presencia de obstáculos o terrenos de alto costo, el costo real siempre será igual o mayor que el estimado.
2. **Uso optimista del factor de ahorro de la nave:** En la segunda componente de la heurística, se considera que el trayecto entre la nave y la muestra tiene un costo reducido al 50 % (esto considerando espacios sin obstáculos, pero como la nave los "salta"se generalizó). Este es un supuesto optimista, ya que no contempla el consumo de combustible ni los posibles desvíos necesarios para alcanzar la nave. Por tanto, el costo real de utilizar la nave siempre será igual o mayor que el estimado por la heurística.
3. **Función Min:** Al tomar el mínimo entre ambas estimaciones ($d(a,m)$ y $d(a,\text{nave})+0{,}5 \cdot d(\text{nave},m)$), la función $h(n)$ siempre selecciona la opción con el menor valor posible, garantizando así que la heurística no excede el costo real esperado.
4. **Consistencia:** La diferencia de heurísticas entre dos estados consecutivos nunca supera el costo real del paso entre ellos, ya que la distancia Manhattan satisface la desigualdad. Esto asegura que $h(n)$ sea consistente, y por tanto, también admisible.

En consecuencia, la heurística planteada es **admisible y consistente**, lo que garantiza que el algoritmo A* encontrará una solución óptima. Además, su formulación es computacionalmente eficiente, puesto que se basa en operaciones aritméticas simples y en la distancia Manhattan, lo que permite un cálculo rápido incluso en entornos grandes.

Evidencia de Admisibilidad: Comparación $h(n)$ vs costo real

A continuación se presentan ejemplos concretos (estados) en los que se calcula la heurística propuesta y se compara con el costo real mínimo necesario para alcanzar la muestra indicada. En todos los casos se verificará la desigualdad:

$$h(n) \leq \text{costo real mínimo}$$

lo que constituye evidencia numérica que apoya la admisibilidad de la heurística.

Ejemplos: Comparación $h(n)$ vs costo real

Para comprobar empíricamente que la heurística planteada es admisible, se compararon sus valores con los costos reales mínimos en distintos escenarios del entorno. En todos los casos se observó que la heurística subestima o iguala el costo real, sin llegar a sobreestimarlo.

Ejemplo 1. Si el astronauta se encuentra en la posición $(0, 0)$, la nave en $(0, 2)$ y una muestra en $(0, 5)$, la distancia Manhattan directa entre el astronauta y la muestra es de 5 unidades. La heurística evalúa dos opciones:

$$h(n) = \text{mín}(5,\ 2 + 0{,}5 \times 3) = \text{mín}(5, 3{,}5) = 3{,}5$$

El costo real mínimo para este caso es exactamente 3,5 (dos pasos a la nave y tres pasos con la nave activa, cuyo costo es la mitad por celda). Por lo tanto, $h(n) = 3{,}5$ coincide con el costo real, cumpliendo la condición de admisibilidad.

Ejemplo 2. Consideremos al astronauta en $(0, 0)$, sin nave disponible, y una muestra en $(0, 3)$. La heurística estima simplemente:

$$h(n) = d(a, m) = 3$$

Sin embargo, si entre $(0, 1)$ y $(0, 2)$ existen terrenos volcánicos y rocosos, el costo real se eleva (por ejemplo, $5 + 1 + 1 = 7$). La heurística, al no contemplar estos obstáculos, entrega una estimación optimista $(3 < 7)$, manteniendo la propiedad de no sobreestimar.

Ejemplo 3. Si el astronauta está en $(2, 1)$, la nave en $(0, 1)$ y una muestra en $(2, 7)$, la heurística considera:

$$h(n) = \text{mín}(6,\ 2 + 0{,}5 \times 8) = \text{mín}(6, 6) = 6$$

y el costo real, suponiendo un camino libre de obstáculos, también es de 6. En presencia de terrenos costosos, el costo real aumentaría, pero nunca sería menor que 6. De este modo, la heurística vuelve a ser una subestimación válida.

En los tres casos anteriores se cumple que:

$$h(n) \leq \text{costo real mínimo}$$

La heurística solo utiliza información optimista: la distancia Manhattan (que ignora obstáculos) y el factor de ahorro por la nave (que asume desplazamiento ideal sin restricciones). Por ello, aunque puede subestimar el costo real, nunca lo sobreestima, lo que garantiza su **admisibilidad**. Además, dado que las diferencias entre valores consecutivos de la heurística respetan la desigualdad, $h(n)$ es también consistente, cumpliendo los requisitos teóricos para la admisibilidad de la heurística.