

**ITESM Campus Santa Fe**

**Nombre del bloque:**

TC2008B: Modelación de sistemas multiagentes con gráficas computacionales (Gpo 301)

**Nombre del entregable:**

Reto: Movilidad Urbana - Informe

**Equipo 8:**

Aquiba Yudah Benarroch Bittan, A01783710

Diego Córdova Rodríguez, A01781166

Lorena Estefanía Chewtat Torres, A01785378

**Profesores:**

Octavio Navarro Hinojosa

Gilberto Echeverría Furió

**Fecha de entrega:**

4 de diciembre de 2025

## Índice

<b>1.- Introducción.....</b>	<b>3</b>
Problema a Resolver.....	3
Propuesta de Solución.....	4
<b>2.- Diseño de los agentes.....</b>	<b>5</b>
Coches.....	5
Objetivo.....	5
Capacidad efectora.....	5
Percepción.....	6
Características.....	6
Métricas de desempeño.....	8
Ambulancias.....	9
Objetivo.....	9
Capacidad efectora.....	9
Percepción.....	10
Características.....	10
Métricas de desempeño.....	11
<b>3.- Arquitectura de subsunción de los agentes.....</b>	<b>12</b>
Coches / Ambulancias sin emergencia.....	13
Ambulancias en Emergencia.....	14
<b>4.- Características del ambiente.....</b>	<b>15</b>
PEAS.....	18
<b>5.- Estadísticas recolectadas.....</b>	<b>20</b>
Configuración 1 (Parámetros por defecto).....	21
Configuración 2 (Tráfico reducido).....	24
Configuración 3 (Muchas ambulancias / muchas emergencias).....	27
Configuración 4 (Alta generación de vehículos, ambulancias y mapa grande).....	30
Configuración 5 (Mayor generación de vehículos, ambulancias y mapa grande).....	34
<b>6.- Análisis de resultados.....</b>	<b>37</b>
<b>7.- Conclusiones.....</b>	<b>39</b>

## 1.- Introducción

### Problema a Resolver

El problema planteado consiste en desarrollar una simulación y visualización en WebGL de una ciudad de MxN espacios. Dentro de la ciudad, cada espacio puede estar compuesto por un edificio, calle, semáforo, coche o ambulancia. De esta manera, se busca dar solución al constante crecimiento del uso de automóviles en las últimas décadas, lo que fomenta políticas públicas erróneamente asociadas con la movilidad sostenible.

De esta manera, la simulación desarrollada busca reducir la congestión vehicular al simular de manera gráfica el tráfico, representando la salida de un sistema multi agentes.

Se tienen las siguientes consideraciones:

- Los vehículos solo se pueden mover en el sentido de las calles.
- Se van agregando vehículos al ambiente cada 10 steps en los puntos de inicio de la simulación.
- El objetivo de los vehículos es llegar a un punto de destino. Cuando un vehículo llega a su punto de destino, el vehículo se quita del ambiente.
- Los vehículos tienen que evitar obstáculos, evitar chocar, respetar los semáforos del ambiente y hacer espacio para ambulancias en estado de emergencia.
- La simulación se detiene si ya no se pueden agregar más vehículos al ambiente.

## **Propuesta de Solución**

La solución propuesta consiste en optimizar el flujo vehicular en ciudades congestionadas. Al ser un equipo conformado por tres personas, se requiere de un elemento adicional para ser agregado a la simulación. En este caso, se decidió la adición de vehículos en forma de ambulancias. Su forma de operar y tomar decisiones es similar a la de los coches ya existentes; sin embargo, son capaces de saltarse semáforos y evitar vehículos cuando se encuentran en estado de emergencia.

Así, cada vehículo es capaz de tomar sus propias decisiones en base a la información que conoce en cada paso. Cada vehículo es capaz de percibir únicamente las 8 celdas a su alrededor; sin embargo, son capaces de detectar ambulancias a distancias mayores, hasta con un radio de 2 celdas. Se determinó este valor para no provocar reacciones abruptas de los coches que se vieran de forma errónea al visualizar la simulación.

Para que cada vehículo sea capaz de encontrar el camino hacia su destino (hospitales en el caso de ambulancias), se plantea el uso del algoritmo A\*. Inicialmente, los vehículos conocen únicamente la celda en la cual se encuentra su destino, la cual es designada de manera aleatoria al ejecutar la simulación.

En cada paso, los vehículos son capaces de evaluar su celda directamente en frente en busca de semáforos u otros vehículos, mientras que detectan ambulancias a su alrededor. Cuando varios vehículos (coches y ambulancias) coexisten en el mismo ambiente, cada uno tiene habilidades sociales para interactuar entre sí y no bloquear sus caminos. Esto es especialmente notorio con coches, ya que cuando detectan una ambulancia en emergencia, buscarán celdas a su alrededor que no bloquen el camino ya existente que están tomando las ambulancias.

Además, se propone la posibilidad de que cada vehículo sea capaz de recalcular la ruta más corta hacia su destino con A\*, solo después de que se agote un “contador de paciencia”. Si se recalculta la ruta y no se encuentra un destino, se utiliza el camino hacia la celda encontrada más cercana hacia el destino. Aunado a esto, los vehículos son capaces de cambiar de carril cuando un vehículo enfrente tiene uno disponible al lado. Esto es especialmente útil para ocupar la mayor cantidad de celdas en la simulación.

## **2.- Diseño de los agentes**

En este caso, tenemos dos tipos de agentes presentes en el ambiente, coches y ambulancias. Ambos consisten en agentes independientes que pueden tomar decisiones en base a lo que se percibe del ambiente.

### **Coches**

#### **Objetivo**

Llegar a los destinos que se les asignó aleatoriamente de la manera más rápida posible, sin chocar ni esperar indefinidamente en la calle.

#### **Capacidad efectora**

Aunque los carros no tienen la capacidad de modificar el ambiente, sí son capaces de detectar los agentes a su alrededor (obstáculos o ambulancias) para determinar su siguiente estado, moverse, esperar o eliminarse al llegar a su destino.

Los carros pueden realizar las siguientes acciones:

- Revisar obstáculos a su alrededor
  - Son capaces de detectar ambulancias, otros coches, semáforos, calles, edificios, entre otros.
  - En caso de encontrar una ambulancia, es capaz de moverse hacia otra celda diagonal o adyacente para no bloquear su camino y liberar el paso.
  - En caso de encontrar otro vehículo, siempre busca avanzar de forma que no se interponga al paso del otro vehículo.
- Calcular la ruta hacia su destino y seguirla
  - A través del algoritmo A\*, cada coche es capaz de calcular la ruta más corta hacia su destino definido.
  - Una vez calculada la ruta, los coches son capaces de seguir la ruta paso a paso, considerando otros obstáculos o vehículos.
- Esperar otro coche o luz de tráfico

- Si el paso del coche está bloqueado por otro vehículo o tiene un semáforo con luz roja, espera.
- Esto evita que los coches colisionen unos con los otros.
- Cuando un coche espera a otro enfrente de él, es capaz de cambiar de carril a uno de enfrente para no desperdiciar espacio.

## **Percepción**

Los coches son capaces de percibir el ambiente de diversas maneras. Por un lado, son capaces de detectar sus ocho celdas vecinas (en sentido horizontal, vertical y diagonal) en busca de obstáculos, edificios u otros vehículos. Esto les permite tomar decisiones para moverse hacia la celda adecuada. De la misma forma, son capaces de percibir su propia celda, con la finalidad de detectar si hay una calle y saber en qué dirección se deben mover para el siguiente episodio.

Por otro lado, son capaces de percibir ambulancias (en emergencia o no) en sus celdas vecinas, lo que les permite obtener su estado y actuar de acuerdo a este. Si se da el caso en el tengan una ambulancia cercana en emergencia, buscarán actuar de forma adecuada para moverse a una celda que no bloquee el camino actual de la misma.

## **Características**

- **Proactividad**

Los coches se consideran proactivos porque sus comportamientos están orientados a cumplir su objetivo principal, que es llegar a su destino de la forma más eficiente posible, sin chocar ni quedarse esperando por periodos de tiempo indefinidos. Esta proactividad se muestra cuando toman la iniciativa para calcular la ruta más corta mediante el algoritmo A\*, buscando siempre optimizar su desplazamiento.

Además, realizan acciones planificadas para mantener una circulación segura, como respetar las reglas de tránsito y organizar su movimiento para evitar situaciones problemáticas. Incluso en escenarios donde aparecen ambulancias en emergencia, los coches ajustan su comportamiento para mantener el flujo adecuado.

- **Reactividad**

Los coches son agentes reactivos que perciben lo que ocurre a su alrededor y ajustan su comportamiento conforme el ambiente cambia. Esto se ve claramente cuando se encuentran con un semáforo en rojo, porque esperan a que el semáforo esté en verde antes de avanzar. Si pasan demasiado tiempo detenidos, vuelven a calcular su ruta para intentar encontrar otro camino hacia su destino.

También reaccionan cuando detectan una ambulancia en emergencia y buscan moverse para dejarle el paso libre. Lo mismo sucede con otros coches, si alguno frena o se mueve de manera repentina, los demás son capaces de detenerse a tiempo, evitar choques y ajustar su camino para mantener el flujo seguro.

- **Habilidad social**

Los coches presentan ciertas habilidades sociales dentro del sistema. Aunque no se comunican de forma explícita entre ellos, sí muestran una forma de habilidad social porque son capaces de interactuar con otros agentes para cumplir su objetivo. Por ejemplo, pueden detectar la presencia de otros coches y ajustar su movimiento o pararse para evitar choques. También modifican su comportamiento cuando aparece una ambulancia en estado de emergencia, dando el paso para permitir que esta avance. Estos comportamientos reflejan una coordinación básica que se considera parte de las habilidades sociales.

- **Racionalidad**

Los coches se pueden considerar como agentes racionales a un bajo nivel. Siempre buscan tomar acciones para lograr sus objetivos con base en su información actual, como su celda, celdas vecinas, otros vehículos, etc. Aunque no son capaces de evaluar consecuencias como deseables/indeseables más allá de sus reglas establecidas. Su desempeño se puede medir a partir del número de choques en la simulación, si ha llegado a su destino y en cuántos pasos.

Por otro lado, los coches se pueden considerar como no omniscientes, ya que aunque tomen decisiones en base a condiciones, no conocen el verdadero efecto de esas acciones en la simulación. No aprenden de sus acciones y tampoco son capaces de planificar a largo plazo (futuros pasos), pues consiguen información que necesita en cada paso de forma independiente, sin intervención de otros agentes que le digan cómo comportarse directamente.

## Métricas de desempeño

Los coches cuentan con diferentes métricas de desempeño para medir si se ha cumplido con su objetivo o no, y en qué medida. A continuación se presentan las métricas de desempeño definidas:

- Número de choques en la simulación
  - Indica cuántos vehículos han chocado en la simulación.
  - A mayor cantidad de colisiones, menor eficiencia.
  - Si un coche choca, es eliminado de la simulación, indicando que fracasó en cumplir su objetivo.
- Llegada a destino
  - Indica si un coche fue capaz de llegar o no a su destino. En caso afirmativo, sus funciones realizadas fueron correctas; pero en el caso contrario, fracasó en cumplir su objetivo de manera adecuada.
- Número de coches actuales en la simulación
  - Esta métrica nos permite identificar cuántos coches ha habido en el ambiente en total y en el paso actual. Esto nos permite comparar en qué medida los coches permanecen en el ambiente y por cuánto tiempo.

## **Ambulancias**

### **Objetivo**

Llegar a su hospital asignado lo más rápido posible, evitando chocar con otros vehículos o quedarse esperando en una celda por un tiempo indefinido.

### **Capacidad efectora**

Las ambulancias no tienen la capacidad de modificar el ambiente, no obstante, sí pueden modificar los agentes dentro del mismo.

Las ambulancias pueden realizar las siguientes acciones:

- Revisar obstáculos a su alrededor
  - Son capaces de detectar coches, otras ambulancias, semáforos, calles, edificios, entre otros.
  - En caso de encontrar un semáforo en rojo lo ignora.
  - Siempre busca avanzar de forma en que llegue a su destino rápido.
- Calcular la ruta hacia su destino y seguirla
  - A través del algoritmo A\*, cada ambulancia es capaz de calcular la ruta más corta hacia su hospital destino definido.
  - Una vez calculada la ruta, son capaces de seguirla paso a paso, considerando otros obstáculos o vehículos.
- Obligar a coches a despejar el camino
  - Cuando otros coches detectan a una ambulancia en emergencia cerca, automáticamente buscan moverse a una celda adyacente o diagonal que esté libre para despejar su ruta.
- Ignorar semáforos en rojo
  - Cuando una ambulancia se encuentra en estado de emergencia, siempre ignorará los semáforos, avanzando sin tener en cuenta su estado.
  - Si una ambulancia no se encuentra en estado de emergencia, se comportará de la misma manera que los coches.

## **Percepción**

Las ambulancias son capaces de percibir el ambiente de diversas maneras. Por un lado, son capaces de detectar sus ocho celdas vecinas (en sentido horizontal, vertical y diagonal) en busca de obstáculos, edificios u otros vehículos. Esto les permite tomar decisiones para moverse hacia la celda adecuada. De la misma forma, son capaces de percibir su propia celda, con la finalidad de detectar si hay una calle y saber en qué dirección se deben mover para el siguiente episodio.

Además, son capaces de obtener los estados de los coches y actuar de acuerdo a estos. Si se da el caso en el tengan un coche esperando a otro o el semáforo está en rojo, buscarán actuar de forma adecuada para moverse a una celda que les permita continuar con su camino.

## **Características**

- **Proactividad**

Las ambulancias se consideran proactivas porque sus comportamientos están orientados a cumplir su objetivo principal, que es llegar a su hospital asignado de la forma más eficiente posible. Esta proactividad se muestra cuando toman la iniciativa para calcular la ruta más corta mediante el algoritmo A\*, buscando siempre optimizar su desplazamiento.

Además, en caso de estar en emergencia, realizan acciones planificadas para llegar a su destino, como ignorar las reglas de tránsito y organizar su movimiento. Incluso en escenarios donde los coches están en espera, la ambulancia busca el camino óptimo y se mueve para llegar a su objetivo.

- **Reactividad**

Las ambulancias son agentes reactivos, siendo capaces de percibir su entorno y responder a los cambios en este para llegar a su destino. A diferencia de otros coches, la ambulancia en estado de emergencia no se detiene ante semáforos en rojo, debido que al detectarlo en rojo, lo ignora y continúa alcanzando. Asimismo, si su ruta se ve bloqueada por

otros vehículos, reaccionan al moverse a celdas adyacentes para despejar su propio camino. En caso de estar bloqueada, es capaz de recalcular su A\* para llegar a su destino.

- **Habilidad social**

Las ambulancias presentan ciertas habilidades sociales dentro del sistema. Aunque en teoría no se comunican de forma explícita entre ellos, sí muestran una forma de habilidad social porque son capaces de interactuar con otros agentes para cumplir su objetivo. Por ejemplo, pueden detectar la presencia de otros coches y ajustar su movimiento. También modifican su comportamiento cuando aparece un coche en estado de espera, buscando el paso para continuar con el camino. Estos comportamientos reflejan una coordinación básica que se considera parte de las habilidades sociales.

- **Racionalidad**

Las ambulancias se pueden considerar como agentes racionales a un bajo nivel. Siempre buscan tomar acciones para lograr sus objetivos con base en su información actual, como su celda, celdas vecinas, otros vehículos, etc. Aunque no son capaces de evaluar consecuencias como deseables/indeseables más allá de sus reglas establecidas. Su desempeño se puede medir a partir del número de choques en la simulación, si ha llegado a su destino y en cuántos pasos.

Por otro lado, las ambulancias se pueden considerar como no omniscientes, ya que aunque tomen decisiones en base a condiciones, no conocen el verdadero efecto de esas acciones en la simulación. No aprenden de sus acciones y tampoco son capaces de planificar a largo plazo (futuros pasos), pues consiguen información que necesita en cada paso de forma independiente, sin intervención de otros agentes que le digan cómo comportarse directamente.

## **Métricas de desempeño**

Las ambulancias cuentan con diferentes métricas de desempeño para medir si se ha cumplido con su objetivo o no, y en qué medida. A continuación se presentan las métricas de desempeño definidas:

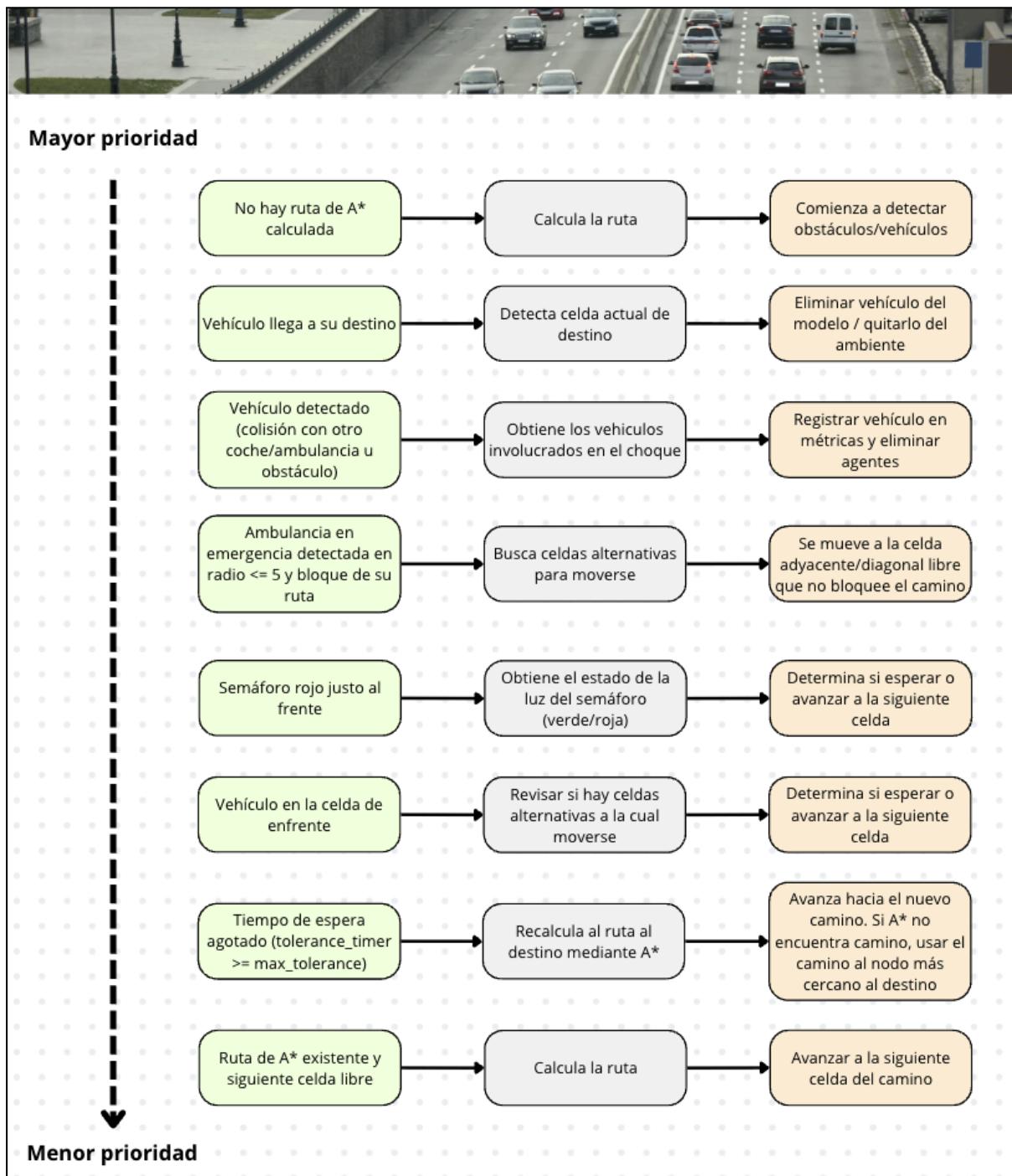
- Número de ambulancias en la simulación
  - Indica cuántos vehículos han chocado en la simulación.
  - A mayor cantidad de colisiones, menor eficiencia.
  - Si una ambulancia choca, es eliminada de la simulación, indicando que fracasó en cumplir su objetivo.
- Llegada a destino (Verdadero o falso)
  - Indica si una ambulancia fue capaz de llegar o no a su hospital asignado. En caso afirmativo, sus funciones realizadas fueron correctas; pero en el caso contrario, fracasó en cumplir su objetivo de manera adecuada.
- Pasos requeridos para llegar al hospital
  - Indica el número total de movimientos que realizó la ambulancia para llegar a su hospital asignado.
  - Lo ideal es que cada ambulancia tenga el número mínimo de movimientos necesarios para llegar a su respectivo hospital asignado.

### **3.- Arquitectura de subsunción de los agentes**

La toma de decisiones de los coches y ambulancias se realizó tomando en cuenta la prioridad de cada una de sus acciones, organizadas en capas jerárquicas.

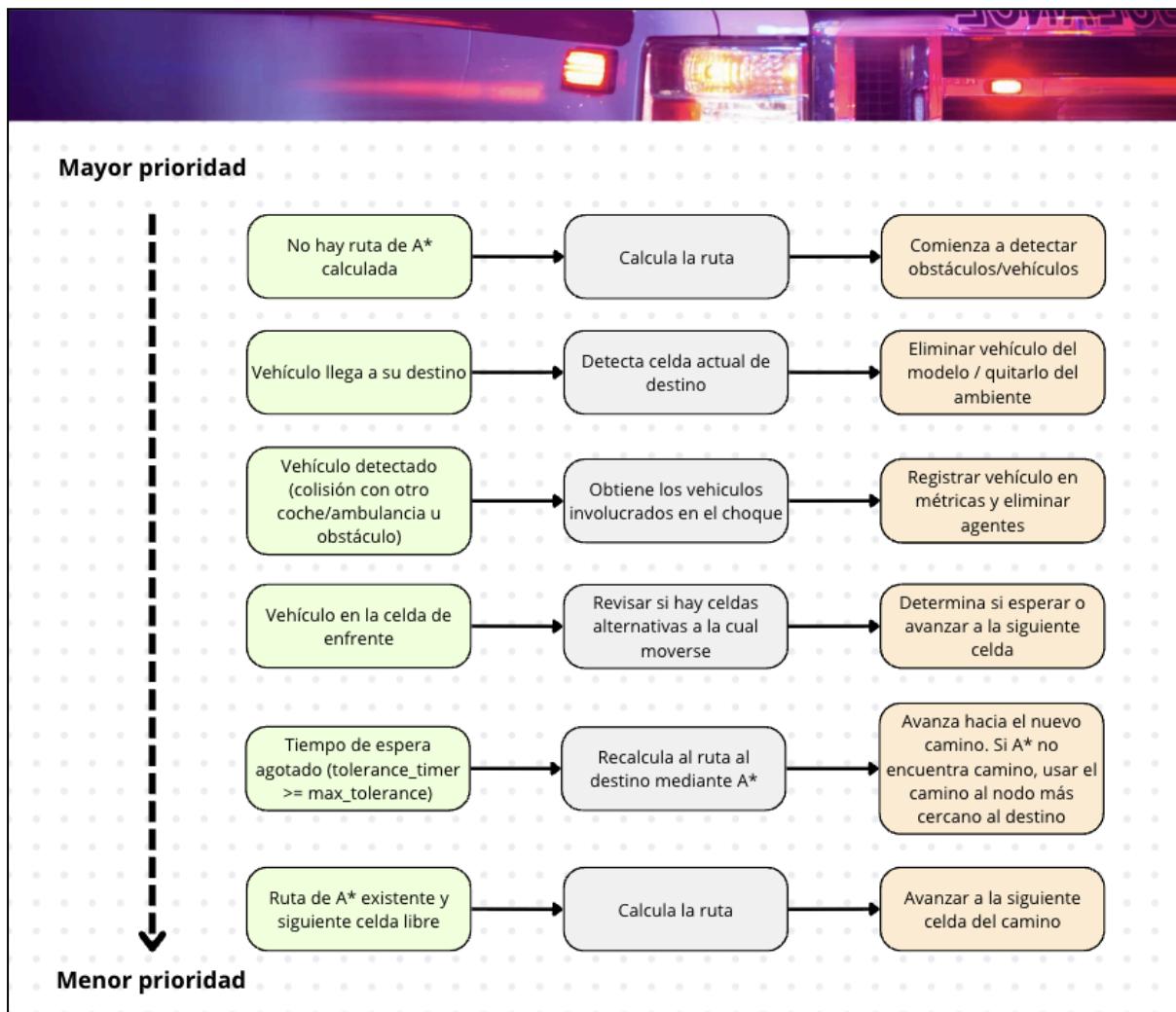
En este sentido, estas acciones se definieron a través de una máquina de estados basada en percepciones locales y del ambiente (celdas vecinas). A continuación se presenta un diagrama para la toma de decisiones de los vehículos a través de su máquina de estados, organizada de mayor a menor prioridad.

## Coches / Ambulancias sin emergencia



**Figura 1.** Arquitectura de subsunción de coches y ambulancias sin estado de emergencia.

## Ambulancias en Emergencia



**Figura 2.** Arquitectura de subsunción de ambulancias con estado de emergencia.

Como se puede observar, la arquitectura de subsunción de los coches y ambulancias sin estado de emergencia son iguales, pues ambos simplemente siguen las mismas reglas de tráfico. Sin embargo, cuando una ambulancia se encuentra en estado de emergencia, no respetarán las reglas de tráfico definidas por semáforos, lo que obliga a otros coches, ambulancias a reaccionar de manera adecuada a esta situación.

De esta manera, cada vehículo es capaz de tomar decisiones en base a la información actual con la que cuenta, buscando llegar a su destino en el menor tiempo posible.

#### **4.- Características del ambiente**

El ambiente de ambas simulaciones consiste en un espacio en forma de matriz (grid) de NxM celdas. Cada celda puede contener diferentes tipos de agentes fijos (los cuales en si no son agentes y son características del ambiente, pero están programados de esta forma para poder ajustarse a la librería usada):

- **Destinos (Destination)**

Representan los puntos finales a los que debe llegar un coche. Funcionan como la meta del coche dentro del sistema, indicando donde termina su ruta planificada. Cada coche tiene asignado uno de estos destinos de forma aleatoria y el A\* calcula su camino hacia este.

- **Hospital (Hospital)**

Representan los puntos finales a los que debe de llegar una ambulancia. Su función principal es servir como la meta de las ambulancias dentro del sistema, indicando donde termina su ruta planificada. Cada ambulancia tiene asignada uno de estos hospitales de forma aleatoria y el A\* calcula su camino hacia este.

- **Semáforos (Traffic\_Light)**

Representan los distintos semáforos que se encuentran en la simulación. Su función es controlar el paso de los vehículos en las calles e intersecciones. Estos mantienen un estado que puede ser verde o rojo, y cambia automáticamente después de cierto número de pasos del modelo.

- **Edificios (Obstacle)**

Representan obstáculos fijos que representan edificios comunes, No pueden atravesarse y los vehículos deben planear su ruta alrededor de ellos.

- **Calle (Road)**

Representan las calles por donde los vehículos pueden circular. Cada calle tiene su propia dirección, lo que permite simular calles con un solo sentido y distintas reglas de tránsito.

- **Banqueta (SideWalk)**

Representan las banquetas del entorno. Son áreas donde se colocan los edificios y funcionan únicamente como parte del entorno. Su propósito es delimitar visualmente las calles y mejorar la representación del mapa.

A continuación se presentan las características principales del ambiente de la simulación:

- **Parcialmente Accesible**

El ambiente de esta simulación es parcialmente accesible porque los vehículos únicamente pueden percibir la celda en la que están y las celdas vecinas más cercanas. No tienen información completa del resto del mapa, ya que no conocen el estado de los demás vehículos, no saben si más adelante hay tráfico, tampoco saben cómo están todos los semáforos ni la ubicación exacta de todos los elementos del entorno.

Debido a estas limitaciones, los vehículos no pueden tomar decisiones con información completa o totalmente actualizada, porque su percepción es local y limitada. Aunque al ejecutar el algoritmo A\* conocen la ruta que deberían seguir y la dirección general hacia su destino, no tienen forma de saber lo que está ocurriendo en las celdas de ese camino en tiempo real.

- **No determinista**

El ambiente de la simulación es no determinista; es decir, las acciones que ocurren dentro del ambiente no siempre serán iguales. Por ejemplo, cuando se inicializa la

simulación, a cada vehículo se le asignan destinos/hospitales aleatorios. Además, la simulación se ve afectada por los parámetros iniciales o archivo .txt de la ciudad inicializada.

- **Episódico:**

El ambiente al cual se enfrentan los agentes de la simulación es episódico, pues solo tienen acceso a la información del propio paso para tomar acciones en el mismo. Por ejemplo, si un carro se va a mover a una nueva dirección, obtiene el siguiente paso de su camino ya calculado para avanzar. De esta manera, ninguno de los agentes es capaz de tomar decisiones futuras con información de diversos pasos para los futuros.

- **Dinámico:**

El ambiente es dinámico, pues se encuentra en constante cambio de acuerdo a las acciones que toman los agentes para moverse alrededor de las calles. Por un lado, los semáforos constantemente alternan entre luz verde/roja. Además, hay una cierta probabilidad de que las ambulancias aparezcan en un estado inicial de emergencia. Debido a esto, los demás vehículos deben ser capaces de adaptarse y moverse alrededor de la ciudad de acuerdo a factores que se escapan de su control.

- **Discreto:**

Es discreto, pues solo hay un número finito y fijo de posibles acciones y percepciones en cada paso. Por ejemplo, un vehículo en una celda determinada sólo es capaz de realizar un conjunto finito de acciones, de acuerdo a sus vecinos y estados internos.

## **PEAS**

- **Performance**

El ambiente cuenta con diferentes métricas de rendimiento para evaluar la capacidad de los agentes de cumplir su objetivo. Entre estas, se encuentran las siguientes:

- Total de coches
- Total de ambulancias
- Total de ambulancias en emergencia
- Total de choques
- Número total de coches que llegaron a su destino
- Número total de ambulancias que llegaron a su hospital
- Carros agregados
- Ambulancias agregadas

- **Environment**

El ambiente consiste en un espacio de NxM celdas que tienen coches (CarAgent), ambulancias (Ambulance), obstáculos (ObstacleAgent), semáforos (Traffic\_Light), destinos (Destination), hospitales (Hospital), calles (Road) y aceras (Sidewalk). El objetivo tanto de los coches como de las ambulancias, es llegar a su destino lo más rápido posible.

- **Actuators**

En cuanto a interacciones en el entorno, los coches y ambulancias poseen diferentes actuadores que les permite modificar su posición, así como reaccionar al entorno. Por ejemplo, ambos vehículos son capaces de avanzar a la celda siguiente dependiendo de la dirección de la calle, detenerse en los semáforos en rojo y ceder el paso a ambulancias en estado de emergencia.

En el caso particular de la ambulancia en estado de emergencia, estas pueden ignorar los semáforos en rojo. Asimismo, pueden continuar su camino sin restricciones para llegar al hospital lo antes posible.

- **Sensors**

Dentro del ambiente, los coches y ambulancias son capaces de percibir información del entorno al revisar sus celdas vecinas. Detectan obstáculos, vehículos, semáforos, calles, aceras, edificios y con toda esa información pueden decidir si avanzar o reajustar la trayectoria.

Además, cada vehículo es capaz de percibir información propia, como su ruta planificada y su posición actual. En el caso de las ambulancias en emergencia, estas detectan si el camino está bloqueado para solicitar a los coches cercanos que se muevan, y en caso de ser necesario, recalcular su ruta para encontrar otra opción viable.

## 5.- Estadísticas recolectadas

Para esta simulación se recopilan cuatro parámetros principales que permiten evaluar el comportamiento del sistema de tráfico: la tasa de generación de autos (Car Spawn Rate), la cantidad de vehículos creados por paso (Vehicles per step), la cantidad de ambulancias generadas por paso (Ambulances per step), el porcentaje de ambulancias que entran en estado de emergencia (Emergency Chance) y la cantidad total de vehículos que llegaron a su destino a lo largo de la simulación (Total Reached Cars Historical).

A partir de estos valores, la simulación genera métricas y gráficas que contienen el número total de coches y ambulancias creados, la cantidad de coches y ambulancias que llegaron a su destino en cierto paso, la cantidad de ambulancias que entraron en emergencia, el número total de choques y la cantidad total de coches que llegaron a su destino en toda la simulación. Estas estadísticas nos permiten observar cómo cambia el flujo del tráfico, qué tan frecuentemente hay ambulancias en emergencia, y cómo responde el sistema ante diferentes situaciones de congestión y prioridad vehicular.

Al momento de ejecutar la simulación, se pueden cargar diversos mapas para correr la simulación, y cada mapa puede tener una distribución diferente de obstáculos, calles, direcciones y destinos. Para probar las simulaciones, utilizamos 2 distintos mapas:

- **Mapa 2022 (2022\_base.txt):** Menor tamaño, mayor número de semáforos y una intersección principal en el centro de la ciudad.
- **Mapa 2025 (2025\_base\_hospital.txt)::** Mayor tamaño, avenidas más largas, menor cantidad de semáforos y mayor cantidad de intersecciones en la zona central de la ciudad.

Cada mapa fue proporcionado con un esquema inicial y se adaptó para que contuviera hospitales, representado a través de letras “H” en el archivo .txt de la ciudad. La ubicación de hospitales permite proporcionar destinos para las ambulancias. De esta manera, al utilizar 2 mapas distintos, podemos ser capaces de evaluar, analizar y observar el comportamiento de la simulación en diferentes ambientes, bajo diferentes circunstancias.

Es importante destacar que esta solo se detendrá al momento de que ya no se puedan añadir vehículos en ninguna de las 4 esquinas de la ciudad que se esté utilizando, por lo que

solo se modificarán los 4 parámetros iniciales para observar cómo diferentes configuraciones afectan el comportamiento global del tráfico y se ejecutará hasta haber llegado aproximadamente al paso 10,000. Al variar los parámetros de la simulación, será posible comparar el nivel de tráfico, los tiempos de llegada, la frecuencia de choques, la proporción de ambulancias en emergencia y el equilibrio del flujo de los vehículos.

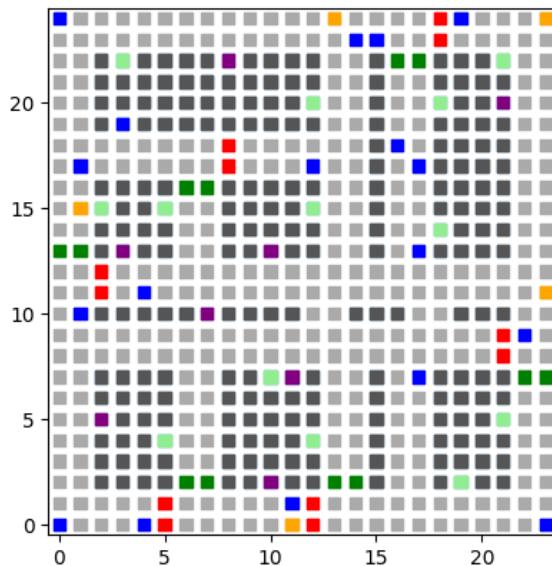
### Configuración 1 (Parámetros por defecto)

Para la primera simulación, se utilizarán los parámetros definidos por defecto. Lo que se busca es analizar que los vehículos (coches y ambulancias) sean capaces de alcanzar sus destinos de manera eficiente.

#### Parámetros

- Car spawn rate: 10
- Vehicles per step: 4
- Ambulances per step: 1
- Emergency state: 0.5

#### Resultados

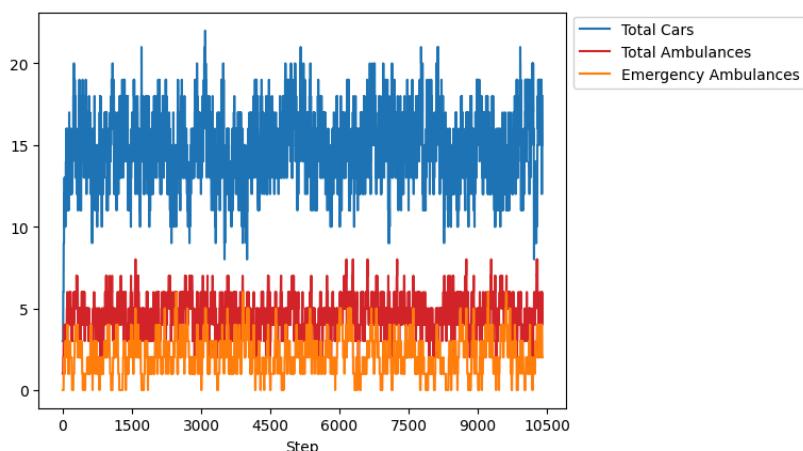


**Figura 3.** Mapa en configuración 1.

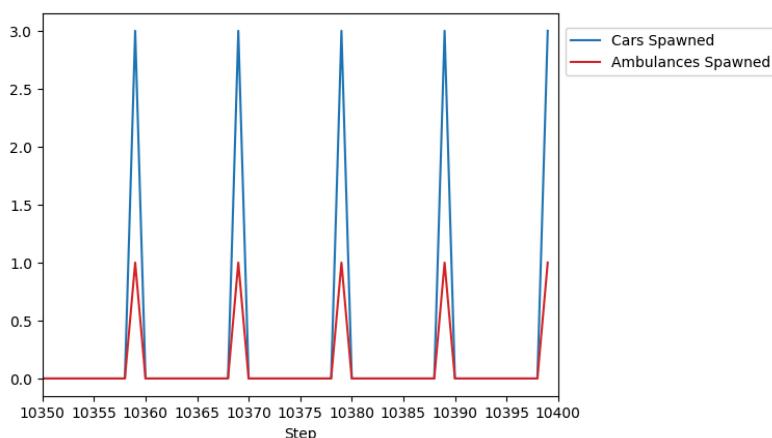
## Gráficas y estadísticas



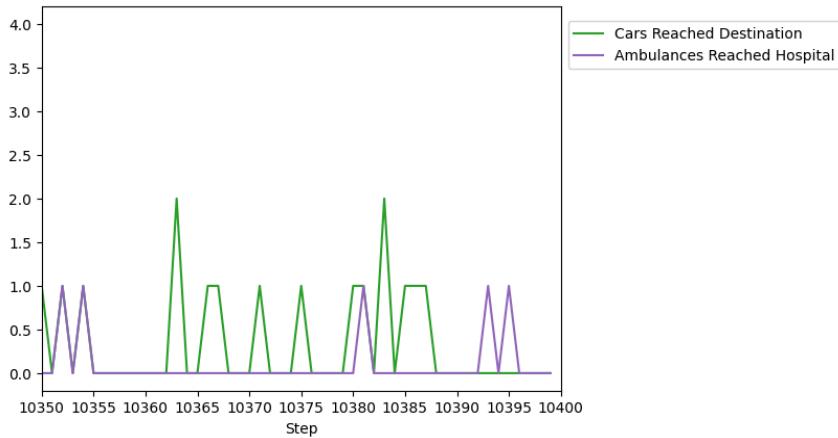
**Figura 4.** Estadísticas históricas en configuración 1.



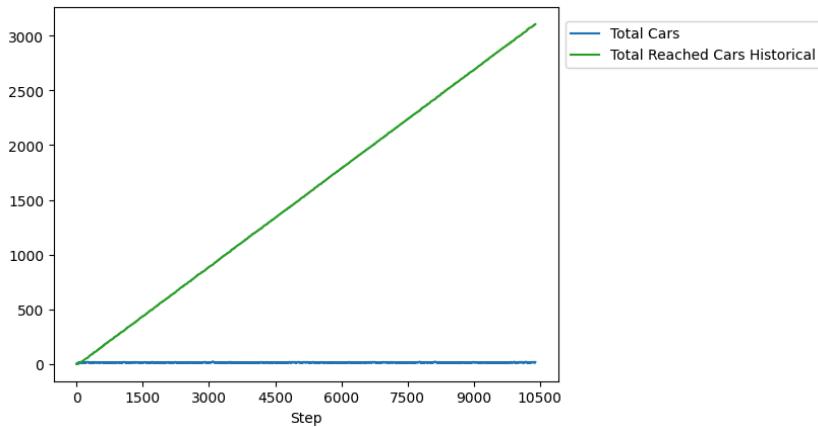
**Gráfica 1.1.** Vehículos totales en configuración 1.



**Gráfica 1.2.** Aparición de vehículos en configuración 1.



**Gráfica 1.3.** Vehículos en destinos en configuración 1.



**Gráfica 1.4.** Vehículos históricos en configuración 1.

Esta simulación funciona como referencia para el funcionamiento del modelo, pues muestra un flujo vehicular muy controlado. La gráfica 1.1 de vehículos totales evidencia que la cantidad de coches en el mapa se mantiene en un rango bajo y estable, aproximadamente entre 10 y 20 durante toda la ejecución. Esto indica que los vehículos avanzan sin interrupciones y logran llegar a su destino sin dificultades, ya que no existen bloqueos en las rutas. Con una probabilidad de emergencia del 50%, las ambulancias con prioridad coexisten de manera equilibrada con las ambulancias normales y otros coches.

También se observa que, como máximo, dos vehículos alcanzan su destino en el mismo paso, para los últimos 50 episodios de la simulación. Esto va de acuerdo a lo esperado, pues indica que las trayectorias que recorren son muy distintas y es poco probable que coincidan exactamente en el tiempo. El resultado más relevante es la ausencia total de

choques, lo que confirma que en condiciones moderadas el sistema es sólido y está muy lejos de cualquier escenario de tráfico crítico.

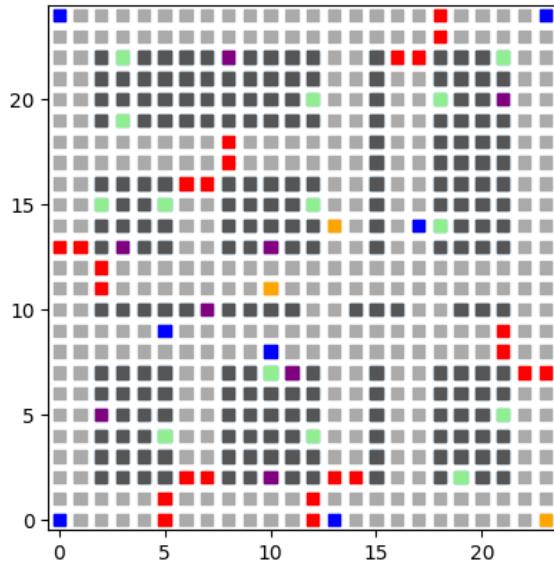
## Configuración 2 (Tráfico reducido)

Para la segunda simulación, se probaron parámetros que redujeron la cantidad de tráfico total en la simulación, buscando obtener un resultado similar al anterior. De esta manera, podemos ser capaces de comparar los resultados de simulaciones con mayor o menor cantidad de vehículos presentes.

### Parámetros

- Car spawn rate: 20
- Vehicles per step: 4
- Ambulances per step: 1
- Emergency state: 0.5

### Resultados

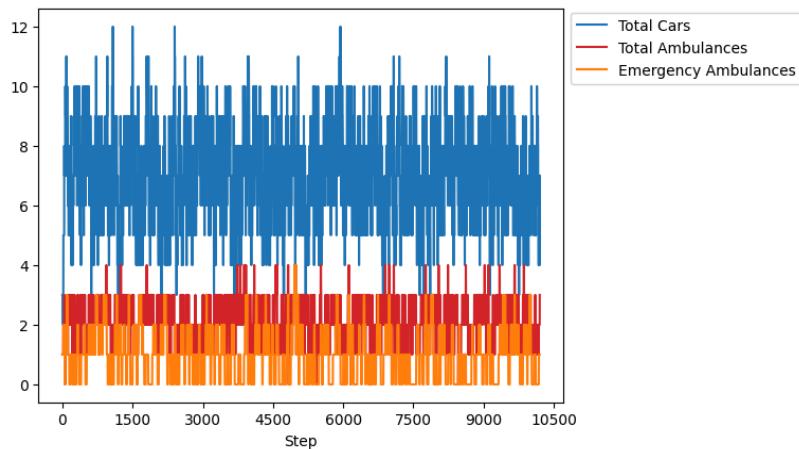


**Figura 5.** Mapa en configuración 2.

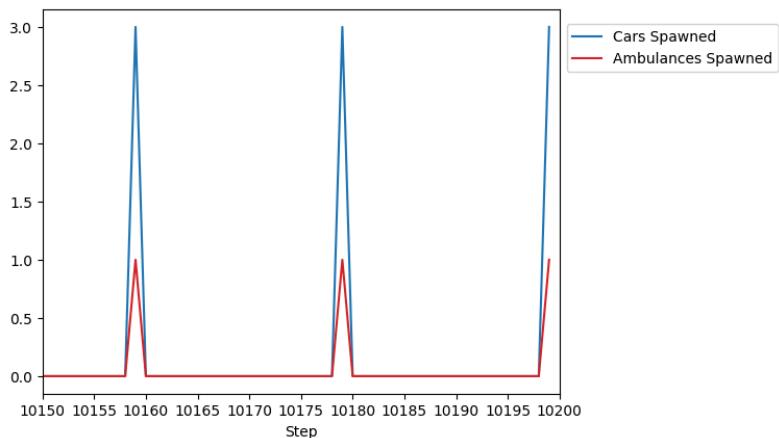
## Gráficas y estadísticas



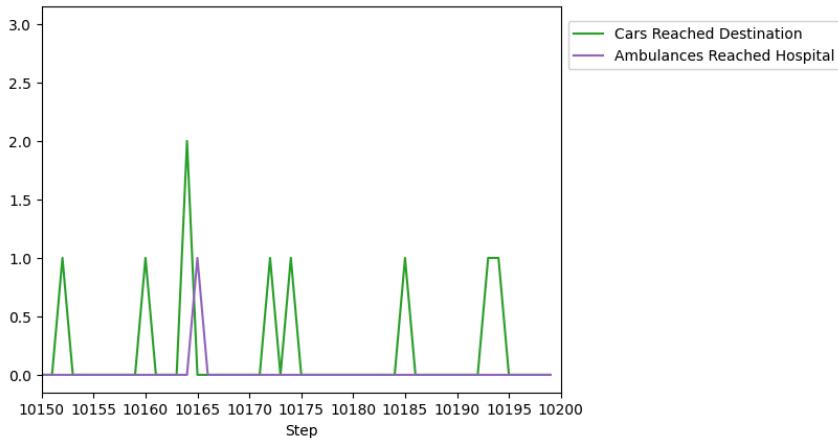
**Figura 6.** Estadísticas históricas en configuración 2.



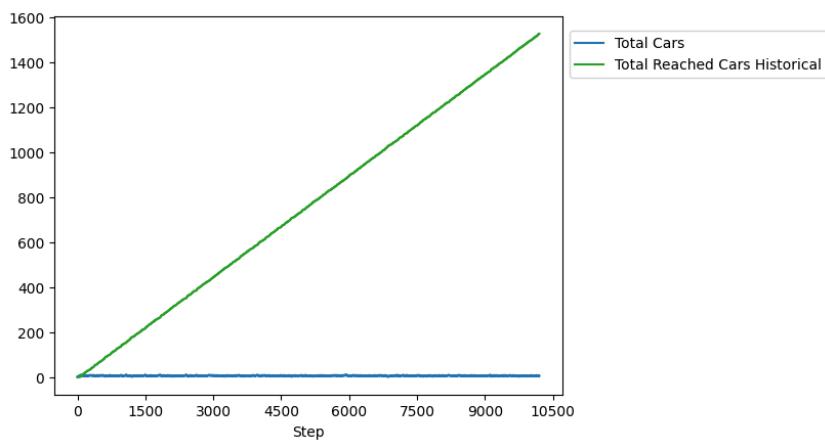
**Gráfica 2.1.** Vehículos totales en configuración 2.



**Gráfica 2.2.** Aparición de vehículos en configuración 2.



**Gráfica 2.3.** Vehículos en destinos en configuración 2.



**Gráfica 2.4.** Vehículos históricos en configuración 2.

En este segundo caso, se buscó reducir la carga del tráfico, duplicando la tasa de aparición de vehículos. De esta manera, al revisar la gráfica 2.1 de vehículos totales, se observa que la cantidad de vehículos presentes en el mapa se redujo ligeramente en comparación a la configuración 1, oscilando entre 4-12 coches y 0-4 ambulancias.

Este comportamiento destaca la importancia del parámetro Vehículos por Paso, que se quedó fijo en cuatro. Aunque la tasa de generación es mayor, solo cuatro vehículos pueden ingresar al mapa en cada paso y este límite se convierte en el verdadero regulador de los vehículos. A través de esto, podemos notar que al agregar menos vehículos a la simulación, el total de estos en circulación se reduce ligeramente, pues todos son capaces de llegar a su destino sin dificultades.

Similar a la configuración anterior, la simulación terminó sin choques. El límite de cuatro vehículos por paso funciona como un mecanismo de control que mantiene un buen flujo y evita la saturación incluso cuando se intenta forzar al sistema a generar un volumen mayor de vehículos.

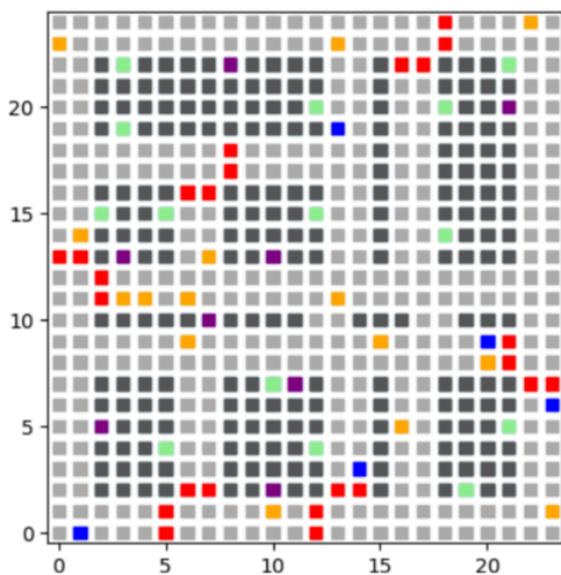
### Configuración 3 (Muchas ambulancias / muchas emergencias)

Para la tercera simulación, se probó aumentar el número de ambulancias de 1 a 3, con la finalidad de analizar qué tanto afectan la capacidad de otros vehículos de alcanzar su destino, así como ver si todos son capaces de alcanzarlos de manera eficiente.

#### Parámetros

- Car spawn rate: 10
- Vehicles per step: 4
- Ambulances per step: 3
- Emergency state: 0.9

#### Resultados

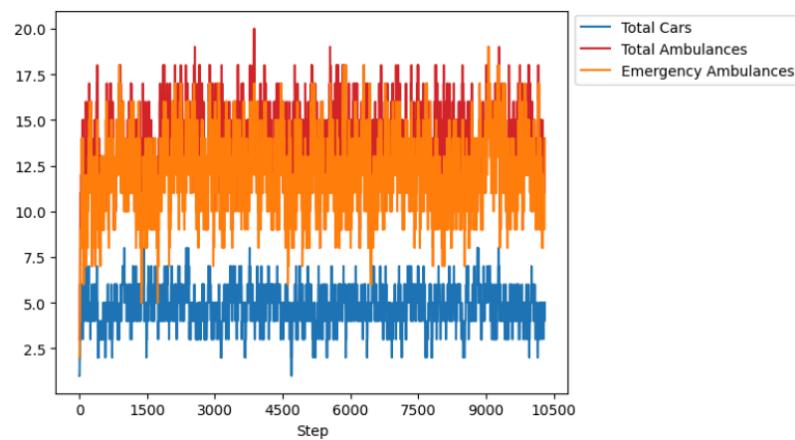


**Figura 7.** Mapa en configuración 3.

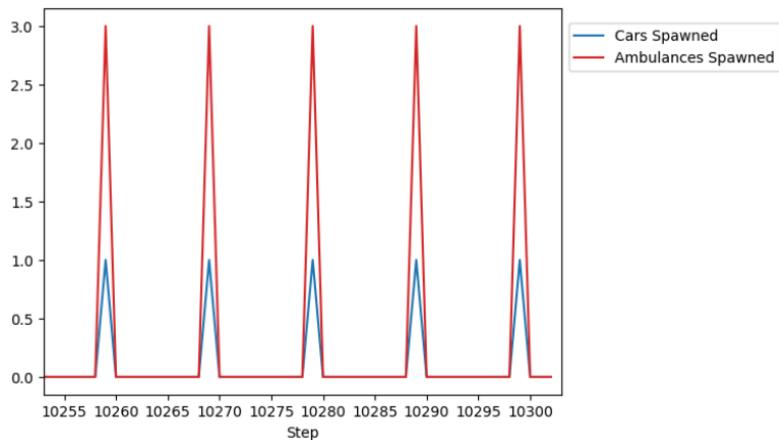
## Gráficas y estadísticas



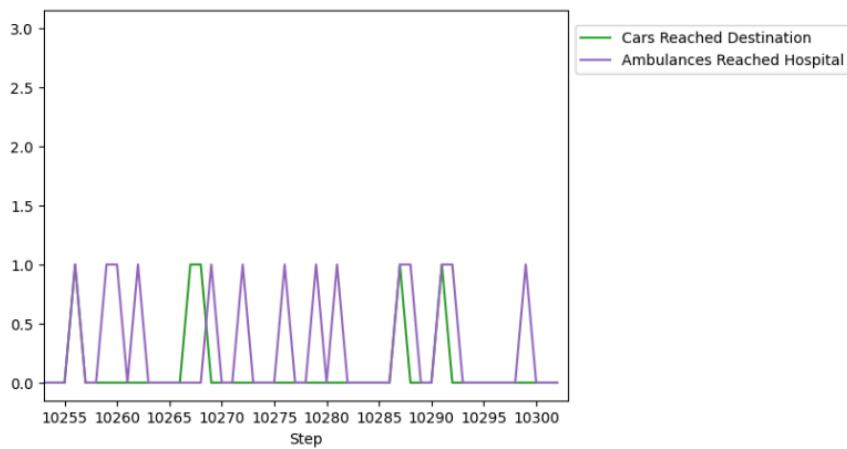
**Figura 8.** Estadísticas históricas en configuración 3.



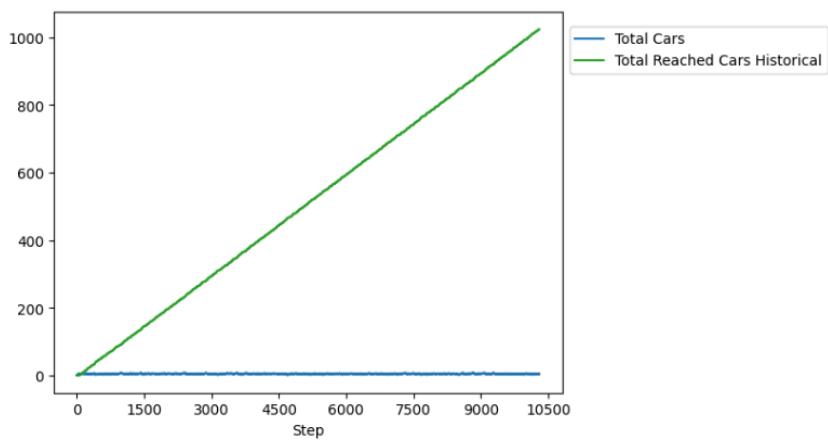
**Gráfica 3.1.** Vehículos totales en configuración 3.



**Gráfica 3.2.** Aparición de vehículos en configuración 3.



**Gráfica 3.3.** Vehículos en destinos en configuración 3.



**Gráfica 3.4.** Vehículos históricos en configuración 3.

En la tercera configuración, el enfoque se centró por completo en la gestión de emergencias. Esto se aprecia claramente en la gráfica 3.1, donde las ambulancias en estado de emergencia se convierten en el tipo de vehículo más frecuente dentro del mapa, junto con ambulancias sin este estado. De esta forma, los vehículos fueron capaces de dar prioridad al paso de ambulancias con emergencias.

La capacidad de respuesta del sistema también queda reflejada en la gráfica de llegadas a destino, donde ahora pueden observarse hasta tres vehículos alcanzando su objetivo en el mismo paso. Esto ocurre porque la mayoría de las ambulancias circulan en estado de emergencia y los demás vehículos ceden el paso, permitiendo un avance más veloz. El hecho de que los choques permanezcan en con un valor de 0 indica que el algoritmo de prioridad está funcionando de manera adecuada, ya que permite mover a las ambulancias con rapidez sin causar choques a otros vehículos.

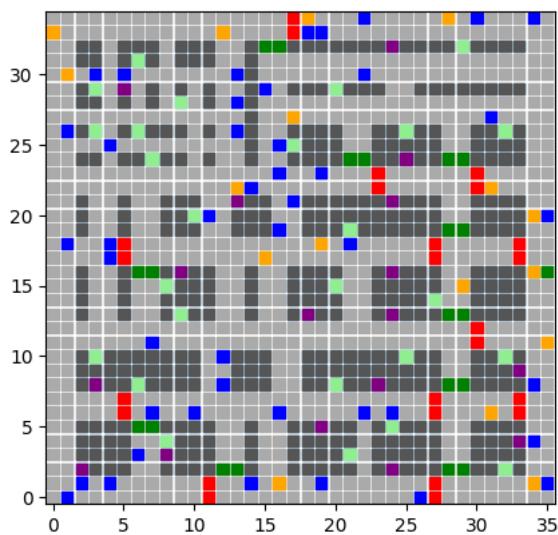
#### **Configuración 4 (Alta generación de vehículos, ambulancias y mapa grande)**

Una vez hemos analizado el comportamiento de vehículos en ambientes controlados, se propuso utilizar un mapa mayor, mismo que fue utilizado para medir la eficiencia de los vehículos para alcanzar sus destinos. De esta forma, establecieron 2 coches y 2 ambulancias para la simulación, con una probabilidad de emergencia de ambulancias de 50%.

#### **Parámetros**

- Car spawn rate: 4
- Vehicles per step: 4
- Ambulances per step: 2
- Emergency chance (%): 0.5

## Resultados

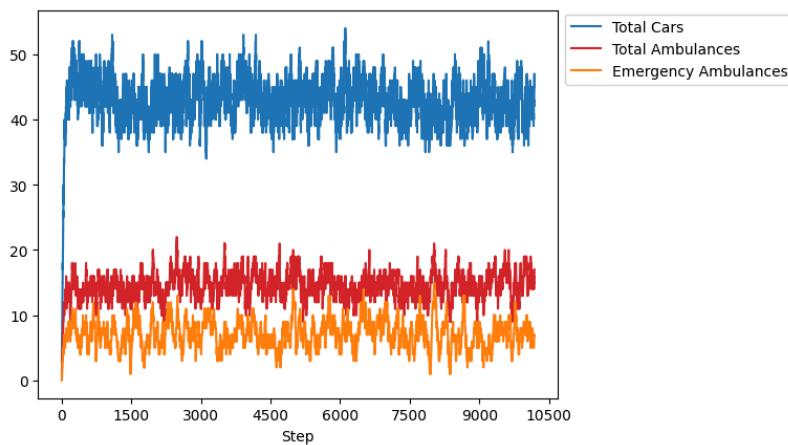


**Figura 9.** Mapa en configuración 4.

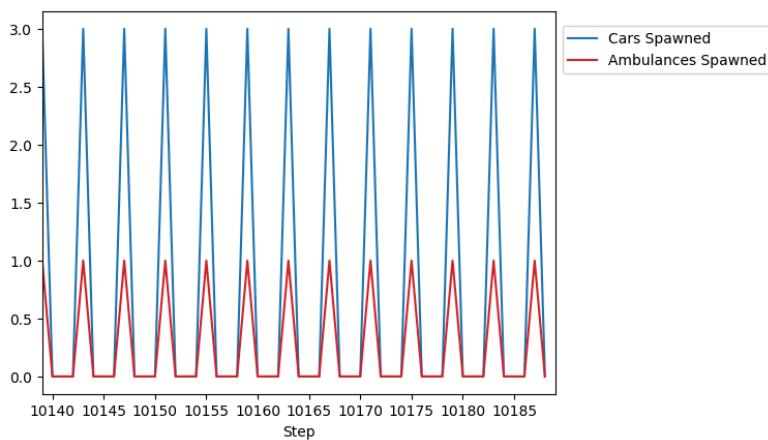
## Gráficas y estadísticas



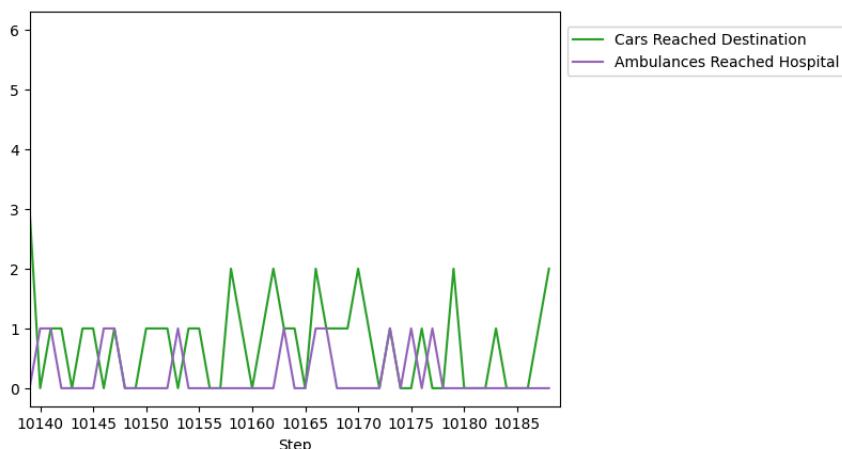
**Figura 10.** Estadísticas históricas en configuración 4.



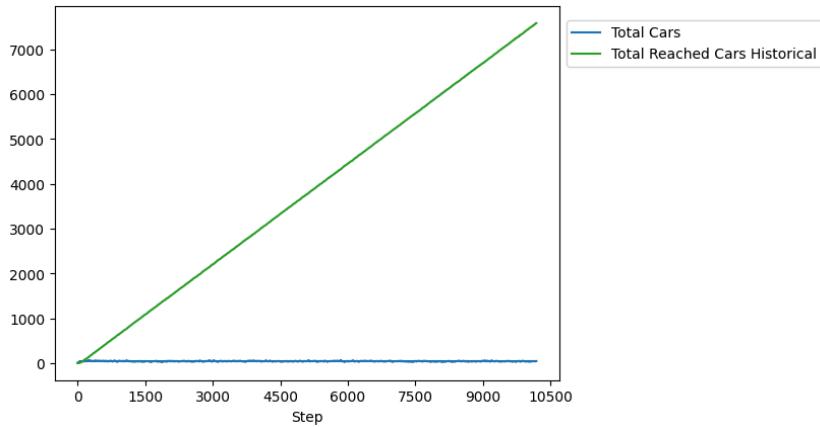
**Gráfica 4.1.** Vehículos totales en configuración 4.



**Gráfica 4.2.** Aparición de vehículos en configuración 4.



**Gráfica 4.3.** Vehículos en destinos en configuración 4.



**Gráfica 4.4.** Vehículos históricos en configuración 4.

En esta simulación, se buscó simular un caso más extremo en el sistema, combinando la demanda máxima de autos con una carga elevada de ambulancias. Se puede observar que en la gráfica 4.1 (vehículos totales en la configuración), hay un incremento en la cantidad de vehículos que entran en el ambiente, oscilando entre 40-50 coches y 0-20 ambulancias. A pesar de esto, se puede observar un número constante de ambas poblaciones. El mayor número de coches en la simulación se debe a que cada paso, aparecen 2 nuevos, mismo fenómeno que ocurre para las ambulancias.

Este aumento significativo de vehículos coincide con la fuerte demanda de generación, que se enfrenta continuamente al límite de ingreso impuesto por el sistema. A pesar de este comportamiento más irregular, el resultado de seguridad se mantuvo sin cambios y la simulación terminó nuevamente con 0 choques. De esta manera, a pesar de generar nuevos vehículos cada 4 pasos, estos son capaces de calcular la ruta hacia su destino y moverse lo suficientemente rápido como para no bloquear la adición de nuevos vehículos en el ambiente.

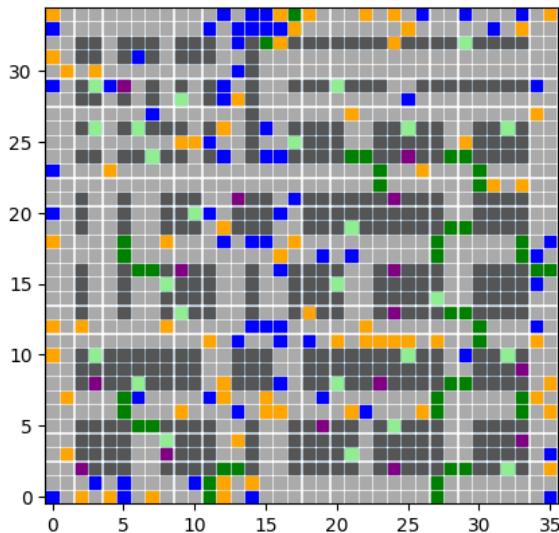
## Configuración 5 (Mayor generación de vehículos, ambulancias y mapa grande)

Finalmente, se experimentó con una simulación donde los vehículos aparecen cada 2 pasos. Esto es debido a que se realizaron pruebas donde aparecían cada paso y esto resultaba en constantes bloqueos por parte de los vehículos, donde a pesar de aumentar distancias a la heurística de A\*, no eran capaces de moverse adecuadamente por todo el mapa. Para esta configuración, se aumentó la probabilidad de emergencia de las ambulancias a 80%, con el fin de analizar qué tanto afecta este parámetro combinado con una mayor generación de vehículos. Los parámetros utilizados se presentan a continuación.

### Parámetros

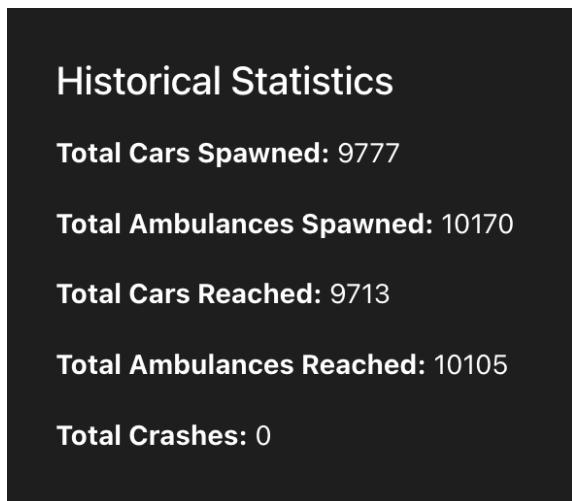
- Car spawn rate: 2
- Vehicles per step: 4
- Ambulances per step: 2
- Emergency chance (%): 0.8

### Resultados

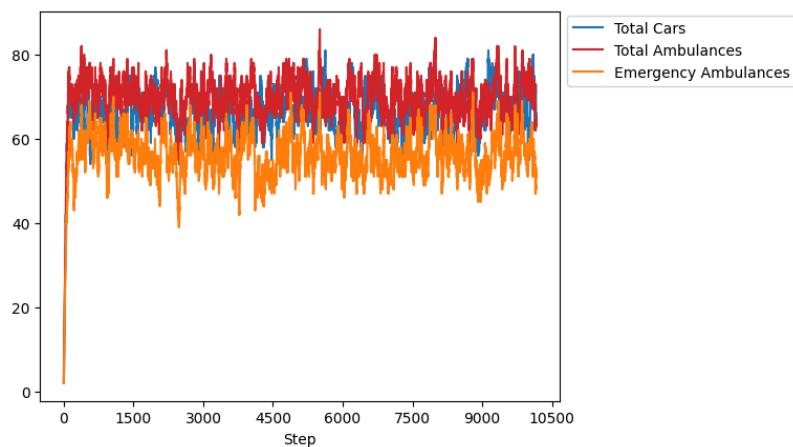


**Figura 11.** Mapa en configuración 5.

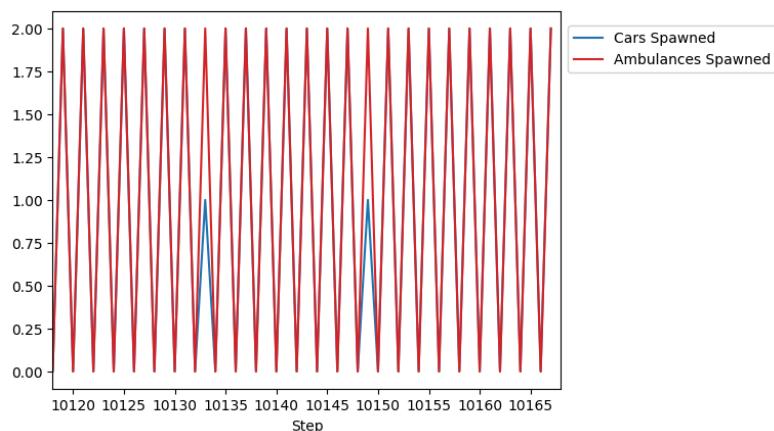
## Gráficas y estadísticas



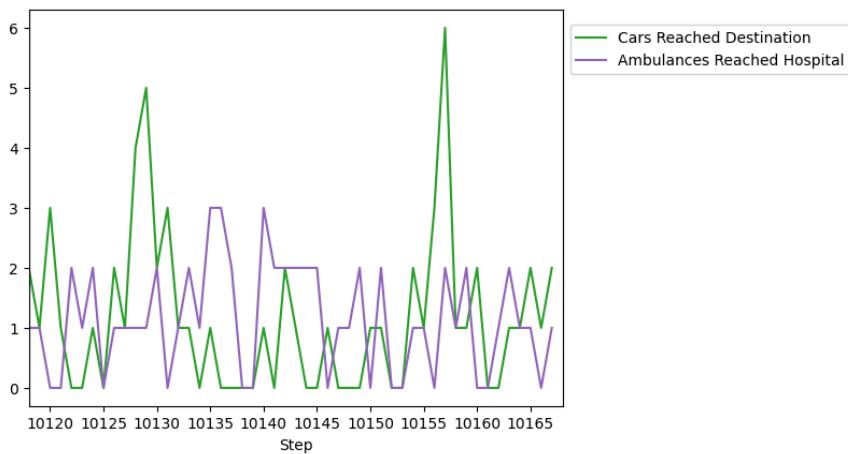
**Figura 12.** Estadísticas históricas en configuración 5.



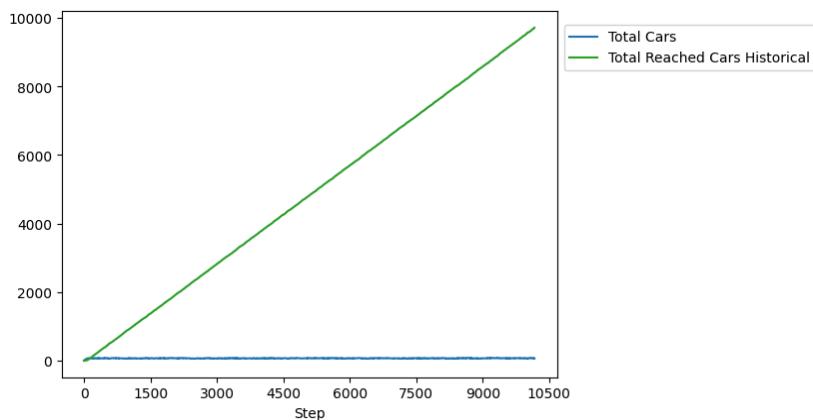
**Gráfica 5.1.** Vehículos totales en configuración 5.



**Gráfica 5.2.** Aparición de vehículos en configuración 5.



**Gráfica 5.3.**Vehículos en destinos en configuración 5.



**Gráfica 5.4.**Vehículos históricos en configuración 5.

Para esta última simulación, se probó un caso en el cual el número de coches que entran en el ambiente es igual al número de ambulancias. Además, cada ambulancia tiene un 80% de probabilidad de tener un estado de emergencia, ignorando semáforos para llegar lo antes posible a sus hospitales destino. En la gráfica 5.1, se pueden ver valores similares en cuanto a la cantidad de vehículos en el ambiente, todos estando en un rango entre 40-80. Sin embargo, se encuentran equilibrados, de forma que en ningún momento llegan a ocurrir congestiones de tráfico que no pueden ser liberadas.

Por otro lado, en la gráfica 5.4, podemos observar un constante crecimiento de la cantidad de coches que llegan a su destino, siempre a la alza, mientras que la cantidad de vehículos en el ambiente se mantiene constante a lo largo de los episodios de la simulación. En cuanto a la gráfica 5.2, se puede ver que los vehículos se agregan de manera adecuada en

la simulación. Además, en la gráfica 5.3, tanto coches como ambulancias llegaron correctamente a sus destinos de manera constante.

Finalmente, se puede ver un equilibrio entre ambas poblaciones de vehículos al momento de llegar a los destinos. Como se puede ver en la figura 12 con las estadísticas históricas en configuración 5, aparecieron 9777 coches y 9713 ambulancias, llegando 101770 y 10105, respectivamente, lo que indica un buen equilibrio entre vehículos entrantes a la simulación y su salida al llegar a sus destinos.

## 6.- Análisis de resultados

Con base en los resultados obtenidos de todas las pruebas realizadas, podemos concluir que el tráfico en las ciudades de prueba tiene un flujo esperado y correcto. Tanto en casos donde la tasa de aparición de los coches y las ambulancias son altas, la simulación demuestra que el programa es eficaz y logra que todos los vehículos lleguen a su destino. Sin embargo, los agentes (coches y ambulancias) presentaron dificultades al momento de reducir la tasa de aparición a 1 paso, llegando a demostrar congestión de avenidas. No obstante, en los demás casos observamos un buen comportamiento del sistema.

Considerando trabajo futuro y futuras posibles implementaciones que ayudarían a mejorar el rendimiento del algoritmo, se podría ajustar la forma en la que se calculan las rutas óptimas hacia los destinos. En nuestro caso, A\* demostró ser un algoritmo eficiente para resolver este problema; sin embargo, la construcción de un grafo donde se utilicen intersecciones o destinos como nodos podría representar una mejora significativa al momento de reducir la congestión vial.

Otra posible solución a este problema sería la de incrementar habilidades sociales y racionalidad de los vehículos, permitiéndoles almacenar información de las celdas que no proporcionan rutas óptimas hacia su destino. De esta manera cuando un vehículo se encuentre cerca de otro, pueden ser capaces de intercambiar celdas marcadas como “no óptimas”, así como comunicar las que ya se han liberado. Así, se puede tener una mejor comunicación entre los agentes y reducir la dependencia que tienen del algoritmo A\*.

Uno de los hallazgos más relevantes encontrados es una relación directa entre el tamaño del mapa y el tráfico. En ambientes más amplios, los vehículos cuentan con mayor espacio para poder distribuirse, reduciendo así la probabilidad de entrar en embotellamientos tempranos y limitar la funcionalidad. Además, esto hace que exista un flujo continuo, permitiendo que los agentes recorren sus rutas asignadas sin interrupciones significativas. Por otro lado, en mapas con tamaños reducidos o mayor número de semáforos, la acumulación de vehículos puede ocasionar puntos donde exista mucha congestión si la generación de coches es alta.

Otro resultado importante es el comportamiento de las ambulancias en estado de emergencia. Cuando la configuración de probabilidad de emergencia es alta, las ambulancias se convierten en el agente dominante dentro de la simulación. Esto debido a que fuerzan a los coches a ceder el paso de manera recurrente. No obstante, los vehículos lograron dar prioridad a las ambulancias con emergencia y aún así mantener un flujo ordenado, logrando que las ambulancias lleguen a su destino de manera veloz.

Finalmente, en todas las configuraciones con una tasa de aparición de vehículos mayor a 1, se observó un comportamiento estable, en el cual el número de vehículos presentes se mantuvo dentro de rangos esperados, mientras que la cantidad de ambulancias y coches llegaban a su destino de manera constante. Esto indica que el sistema es capaz de encontrar naturalmente un equilibrio entre entradas y salidas, reflejando un tráfico moderado y sano en el cual los agentes eran capaces de cumplir el objetivo.

Los resultados demuestran que el diseño de agentes, la arquitectura de subsunción y la estructura del ambiente permiten modelar un comportamiento de tráfico estable y seguro, que funciona en diferentes espacios y configuraciones de ciudades.

## 7.- Conclusiones

A lo largo de este proyecto, se desarrolló una simulación de tráfico basada en agentes racionales capaces de reproducir comportamientos que se asemejan a los de la realidad bajo diferentes niveles de demanda y condiciones. La integración de coches y ambulancias como agentes autónomos nos permitió observar cómo interactúan, se adaptan y responden al ambiente, manteniendo un flujo vehicular estable, sobre todo en escenarios poco usuales, con grandes cantidades de intersecciones o congestiones por altas cantidades de semáforos.

El desafío principal al que nos enfrentamos fue el de hacer que los vehículos fueran capaces de reaccionar de manera adecuada a ambulancias en emergencia cercana, sin realizar movimientos que se salieran en gran medida de algo que pudiera ser considerado realista. Tras realizar pruebas y recopilar estadísticas mediante configuraciones, observamos que factores como el tamaño del mapa, la tasa de generación de vehículos y la proporción de ciertos vehículos con capacidades especiales, como las ambulancias, influyen significativamente en el comportamiento global del tráfico. Aun así, el sistema logró adaptarse a diferentes situaciones sin perder estabilidad, confirmando la buena implementación del diseño.

Los resultados obtenidos se pueden relacionar directamente con la movilidad urbana en México, donde el uso excesivo de vehículos es una causa principal de alta congestión vehicular, aumento de accidentes y contaminación. Así, al implementar algoritmos como A\*, fuimos capaces de guiar a los automóviles a través de caminos que eviten otros vehículos, obstáculos, entre otros. A pesar de solo haber realizado una simulación a escala, en forma de modelo simplificado, este proyecto establece bases para proponer posibles formas de recalcular caminos eficientes dentro de un ambiente urbano con gran densidad de vehículos.

Finalmente, este reto nos permitió comprender los fundamentos de simulaciones multiagentes, así como implementar visualizaciones en WebGL que nos permitan tener un mejor entendimiento de gráficas computacionales. También, este proyecto demostró que los sistemas multiagentes son una herramienta útil para estudiar dinámicas urbanas y explorar posibles soluciones a problemas de movilidad. La simulación nos ayudó a tener una base sólida que podría ampliarse en el futuro al implementar más racionalidad a los agentes o ajustes dinámicos en la infraestructura urbana.