

Simulación multiagente de tráfico vehicular en NetLogo

Brenda Aymerich¹ y César Mata²

CI-1441 Paradigmas computacionales

Escuela de Ciencias de la Computación e Informática

Facultad de Ingeniería

Universidad de Costa Rica

¹brenda.aymerich03@gmail.com, ²cesarmatab@gmail.com

Julio de 2015

Resumen

Este documento describe el proceso de adaptación y experimentación del modelo Traffic Grid de la plataforma NetLogo con el objetivo de incrementar el nivel de realismo de dicha simulación. Para lograrlo se implementó un nuevo agente peatón que cuenta con la libertad de moverse por las aceras del modelo y la posibilidad de cruzar solamente por los pasos peatonales. Además, se agregó un sistema más personalizable que le permite al usuario variar la cantidad de agentes con los que se ejecuta la simulación. De esta forma, los elementos del modelo pueden ser adaptados a las condiciones que establezca el usuario en la interfaz. Pese a que con la experimentación y validación de las nuevas implementaciones se demuestra que se obtiene un modelo más confiable que la simulación base, se reconoce que aún existen factores a incluir o mejorar para su uso en análisis de datos.

Palabras clave: NetLogo, peatones, pasos peatonales, modelo dinámico, sistema multiagente.

1. Introducción

El presente proyecto se basa en un sistema de simulación de tráfico vehicular, el cual combina el paradigma multiagente con un problema externo a las cien-

cias computacionales como lo es la afluencia vehicular en las ciudades. El objetivo principal de esta investigación es incursionar en el modelo de computación multiagente y paralelamente crear una solución más realista que le permita al usuario realizar observaciones y mediciones para aplicar estrategias de mitigación de congestiones, sincronización de semáforos, entre otras. La idea es que el resultado final pueda ser considerado al menos como una base para futuras investigaciones en el tema y no solo como un proyecto experimental.

La simulación multiagente se realizará utilizando la plataforma NetLogo, el cual es un entorno programable orientado al modelado de sistemas multiagentes que, por su versatilidad, es comúnmente utilizado para simular fenómenos naturales y sociales. NetLogo cuenta con una biblioteca predeterminada de modelos dentro de los cuales se incluye una simulación de tráfico básico, la cual será tomada como base para desarrollar el presente proyecto. Debido a esto, es importante recalcar que la simulación cuenta con las limitaciones de validación de datos fuera de la plataforma de NetLogo.

Para lograr incrementar el realismo del modelo se implementarán dos estrategias: agregar los agentes peatones y crear un sistema más dinámico que soporte distintos números de automóviles y peatones durante diferentes periodos de la simulación. Los peatones se diseñarán como agentes con propiedades que les permitirán caminar solamente por las aceras y cruzar

calles sólo por los pasos peatonales. El modelo dinámico, por su parte, le permitirá al usuario simular periodos de mayor y menor afluencia de autos y personas dentro del mundo controlando dichas cantidades por medio de una interfaz.

De esta forma se pretende medir los resultados generados en estos nuevos escenarios y comparar la simulación original con la modificada para comprobar cuál es el impacto de los cambios en cuanto al realismo del sistema.

2. Marco teórico

2.1. Sistemas multiagentes

En las ciencias de la computación el concepto de agente es usado para referirse a entidades que tienen percepción de su entorno mediante sensores y actuar en él por medio de actuadores. Sin embargo, un agente que se considera racional es aquel que realiza acciones basadas en las pruebas presentadas por medio de la secuencia de percepciones (todo lo que el agente ha percibido de su entorno hasta el momento actual) y conocimiento incorporado en él, con el objetivo de maximizar la medida de utilidad en la realización de la tarea (Russell and Norvig, 2009). El concepto de utilidad es general el cual depende del contexto del modelo. Por ejemplo, si se busca minimizar el tiempo de trayecto de un automóvil de un lugar a otro, éste debería tomar las decisiones basadas en tomar las rutas más descongestionadas o que le ayuden lograr de la mejor manera ese objetivo. Ahora bien, en un sistema que se considera multiagente se da la interacción de muchos agentes en un mismo entorno, lo cual da origen a resultados globales que se observan en todo el sistema y que son producto del comportamiento en conjunto de todos ellos. Esta naturaleza de los sistemas multiagentes es por lo que son muy utilizados para simulaciones de la realidad como el flujo vehicular, ya que por medio de software se puede simular situaciones que podrían ser costosas, peligrosas o imposibles de experimentar en la vida real. Las simulaciones con este paradigma se facilitan porque cada agente tiene un conjunto de comportamientos propio y cuando muchos actúan conjuntamente se da la

aparición de un sistema complejo que evoluciona con el tiempo. Ejemplos de usos de éste paradigma para la simulación de tráfico con el objetivo de realizar análisis sobre los datos o realizar la optimización de un objetivo se mencionan más adelante en esta misma sección. Para realizar simulaciones de tráfico vehicular con sistemas multiagentes por lo general los modelos se desarrollan utilizando herramientas de software específicamente diseñadas para el modelado de sistemas multiagentes como lo son SWARM, REPASt y NetLogo. Particularmente en el desarrollo del prototipo de esta investigación se utiliza el entorno NetLogo el cual además de su capacidad de manipular varios agentes, posee herramientas para la construcción sencilla de una interfaz gráfica que permita el control del modelo y monitorear su comportamiento. Éste posee una librería de modelos de diversos temas planteados con sistemas multiagentes de la cual proviene el modelo utilizado como base para este proyecto, llamado *Traffic Grid*. Éste es un modelo que simula calles y avenidas en forma de cuadrícula y de un solo carril por las cuales transitan automóviles. Los elementos con los que cuenta NetLogo a partir de los cuales son contruídos modelos como *Traffic Grid* son: los agentes que se mueven alrededor del mundo llamados “tortugas”, agentes que carecen de movimiento llamados “parches” (*patches*) sobre las cuales se movilizan las “tortugas”, enlaces entre las “tortugas” y el agente observador por medio del cual el usuario puede controlar los componentes del modelo. El tiempo de un modelo en NetLogo está representado con la unidad llamada *tick*, el cual comúnmente es usado para marcar cada vez que se ejecuta el método principal tradicionalmente llamado *Go*. Específicamente en *Traffic Grid* se utilizan las tortugas para modelar los automóviles que se movilizan sobre los *patches* marcados como calles y avenidas, conformando en conjunto un sistema multiagente. Éste carece de links y con el observador se puede ejecutar comandos dirigidos a los agentes que interactúan en este modelo.

2.2. Aplicaciones

Las aplicaciones que se le pueden dar a los sistemas multiagentes son en gran parte derivadas de los campos de investigación en este paradigma, tales co-

mo resoluciones a problemas distribuidos, problemas asociados a la fiabilidad, tolerancia a fallos, organización, comunicación y coordinación. Hoy en día, los sistemas multiagente son utilizados en aplicaciones gráficas tales como juegos de ordenador, en la industria de efectos visuales para películas, aplicaciones a problemas de transporte y sistemas de información geográfica.

Ejemplos del uso de sistemas multiagente para darle solución a problemas similares al que se aborda en esta investigación se tiene el desarrollo de un simulador de tráfico urbano utilizando sistemas multiagentes descrito en *Simulador multi-agente de tráfico urbano*. En este proyecto se realizó un simulador de tráfico urbano utilizando técnicas multiagentes, sobre el ambiente Matlab. Éste modela el entorno que influye en el flujo del tráfico y la trayectoria de los vehículos (Oñate, 2005). Además, realizan distintas simulaciones en diversos escenarios para demostrar la viabilidad del método. Proporciona información de comunicación y cooperación entre agentes utilizando el modelado estático del mapa en el que transcurre la simulación.

Otro ejemplo se describe en *Integrating Mobile Agent Technology with Multi-Agent Systems for Distributed Traffic Detection and Management Systems* publicado en el año 2009. Este artículo describe el crecimiento exponencial que ha tenido la tecnología multiagente en el campo de la informática y su versatilidad para ser aplicada en distintas disciplinas (Chen et al.). Además menciona que pese a que se han realizado estudios sobre sistemas de control y gestión del tráfico basado en agentes y por su parte, se han estudiado a profundidad los sistemas multiagentes, la tecnología de agentes móviles aún no ha sido aplicados en este campo. En particular, la propuesta y lo valioso del enfoque de esta publicación es que se plantea la idea de integrar la tecnología de agentes móviles con los sistemas multiagente para mejorar la capacidad de los sistemas de gestión de tráfico y poder manejar la incertidumbre en un entorno dinámico. Los autores desarrollaron un modelo llamado *Mobile-C*, el cual toma las ventajas de ambos agentes: los estacionarios y los móviles. Los desarrolladores encontraron que la simulación utilizando agentes móviles para el algoritmo dinámico demuestra que los agentes móvi-

les presentan una gran flexibilidad en la gestión de la dinámica en sistemas complejos. Los resultados de la simulación mostraron que los agentes móviles proporcionan una forma efectiva para la implementación de componentes de software dinámico.

2.3. Optimización de un objetivo

En diversas ocasiones los sistemas multiagentes son utilizados para tratar de mejorar la resolución de problemas y optimización en la realización de una tarea u objetivo, en la publicación *Evolving Individual Behavior in a Multi-agent Traffic Simulator*, la cual es parte del libro *Applications of Evolutionary Computation* publicado en el año 2010 se describe un ejemplo de ello. En este trabajo los investigadores se encargan de ilustrar el comportamiento de los conductores mediante sistemas multiagentes evolutivos. Dichos agentes se comportan de manera egoísta, buscando cada uno la mejor ruta que les permita obtener un menor tiempo para llegar a su destino. Utilizando este sistema, los autores afirman que la evolución permite que los agentes se adapten y orienten hacia una conducción más humana basándose en diferentes estrategias (Sanchez et al.). Según los autores, el sistema se diseñó para que cada agente fuera capaz de percibir otros agentes en un determinado radio. Y de acuerdo a esto, los resultados obtenidos fueron que, aun y si no existe cooperación entre los agentes, simplemente el hecho de que ellos sean capaces de percibir su entorno mejora los tiempos promedio de llegada debido a su proceso evolutivo.

2.4. Realismo en una simulación de flujo vehicular

Para la presente investigación se buscó cómo hacer más realista una simulación vehicular, de manera que los resultados pudieran ser más confiables para un futuro uso, por lo tanto, se realizó revisión bibliográfica de soluciones a problemas similares. Entre éstas se tiene el desarrollo del modelo descrito en la publicación *Estudio del Uso de Sistemas Multiagentes para el Modelado del Tráfico de Autos*. Este proyecto constituye el desarrollo de un modelo multiagente que representa el tráfico vehicular presente en una

intersección, utilizando NetLogo como entorno para este propósito. Éste pretende mostrar la viabilidad del uso de sistemas multiagentes para la simulación del flujo de autos, método que le permitió a la autora y a su equipo realizar conjeturas acerca del flujo de automóviles real (Camacho, 2008). La simulación se orienta a una intersección de la ciudad de Mérida.

Con el desarrollo del proyecto se mostró que el uso de la simulación multiagente facilitó la representación de los diferentes tipos de agentes (comportamiento de los conductores de los autos) y la interacción con el entorno de una manera más cercana a la realidad. Además, la plataforma NetLogo fue un buen aliado para la simulación debido a su interfaz amigable. Por otro lado, describe dificultades específicas con la utilización de la simulación multiagente y NetLogo como plataforma para el problema en cuestión.

También se tiene un aporte que describe cómo aumentar el realismo de las simulaciones de tráfico en *Non-normative Behaviour in Multi-agent System: Some Experiments in Traffic Simulation* publicado en el 2006. La importancia de este estudio radica en que muchos de los datos que existen basan sus modelos en que los agentes siempre cumplen las reglas; no obstante, este proyecto describe las ventajas de modelar una simulación en la que los agentes no siempre se apeguen a lo establecido. En particular, el estudio demuestra que, en base a datos estadísticos, la implementación de un sistema multiagente basado en un comportamiento no normativo puede colaborar con el realismo de la investigación (Doniec et al., a).

En el trabajo descrito en *Simulation and Evaluation of Urban Bus Networks Using a Multiagent Approach* publicado en el año 2007 se utiliza un enfoque multiagente para simular el funcionamiento de un sistema de redes de buses urbanos que tiene en cuenta el comportamiento de los viajeros, es decir, toma en cuenta la estimación de la demanda de este transporte público en específico. Además, la simulación mantiene la interacción entre autobuses, pasajeros y tráfico en la carretera, y permite hacer el análisis de la red en diferentes escalas espaciales y temporales (Meignan et al.). Este modelo fue aplicado y validado en un estudio de caso real y es utilizado para diseñar nuevas soluciones de transporte. El principal objetivo de los autores de evaluar las políticas de red de tránsito con

esta simulación, permitiría regular las redes de autobuses cuando suceden eventos como choques, dando así la posibilidad de medir la eficiencia de dichas políticas. Por último se menciona que en obras futuras se consideraría otros medios de transporte público y movimientos más realistas de los autobuses, además de integrar accidentes de tráfico.

Y por último, se tiene el artículo *A Behavioral Multi-Agent Model for Road Traffic Simulation* publicado en el año 2008, en el cual se documenta el diseño de una herramienta de simulación de tráfico vehicular por carretera, incluyendo los cruces de las mismas. El modelo es multiagente y se basa en dos comportamientos individuales de los conductores, primero en los comportamientos oportunistas que explican la violación de normas, y segundo en las habilidades anticipadas de los conductores que permiten que situaciones críticas sean detectadas (Doniec et al., b). Es decir, los conductores pueden elegir el cuándo respetar las normas de tránsito y permitirles a estos agentes tomar decisiones para evitar entornos de embotellamiento. Además, la propuesta fue validada para distintos escenarios de tráfico lo que les permitió comparar el flujo de la simulación con el flujo real.

2.5. Optimización del flujo vehicular

Además de la búsqueda por hacer un modelo más realista, surge la idea de que para una futura mejora al modelo puede ser útil conocer soluciones diseñadas con sistemas multiagentes a problemas que suceden en el escenario de investigación, tales como congestión vehicular u optimización de rutas de destino. Entre esos esfuerzos se puede mencionar el descrito en *A Rule-based Multi-agent System for Road Traffic Management* publicado en el 2009. En el cual, la tesis de los autores radica en que la cooperación entre los agentes participantes mejora sustancialmente el flujo de vehículos en las autopistas. Según los investigadores, el dinamismo de un flujo vehicular hace necesario el control mediante un sistema inteligente que soporte cambios durante el tiempo (demoras, congestiones o choques). Los autores se enfocan, por lo tanto, en un sistema que aborda el problema de los incidentes bajo dos modelos distintos: coordinado (todos los agentes se coordinan para resolver un problema en redes

extensas) y local (en caso de que existan problemas de comunicación, grupos pequeños de agentes trabajan en conjunto para informar a los usuarios sobre el estado del tráfico) (Marti et al.). Según las pruebas realizadas por los autores, el modelo más eficiente resultó ser el de todos los agentes trabajando en conjunto como una sola red; sin embargo, los grupos pequeños de agentes también demostraron ser efectivos para resolver ciertos problemas de flujos. Básicamente, lo que los investigadores demostraron es que este sistema puede tolerar ciertos incidentes gracias a la metodología de resolución de conflictos en conjunto. Similar a lo descrito anteriormente, se recalca el uso de colaboración entre agentes para optimización de tareas en *Sistemas Multiagente Colaborativos*. El proyecto analiza los sistemas multiagentes colaborativos mediante la comparación de seis simulaciones distintas que utilizan este modelo. Cada simulación representa un estilo distinto de colaboración entre los agentes del entorno así como la comunicación entre los mismos (Zapata, 2010). Dichas simulaciones fueron implementadas en NetLogo, plataforma útil para el aprendizaje y desarrollo de sistemas multiagentes colaborativos, según escribe el autor. Luego de la experimentación se muestra cómo la colaboración y comunicación entre agentes permite mejorar el rendimiento de los sistemas multiagentes para lograr objetivos. Apoyando la idea sobre la colaboración entre agentes se tiene un aporte más que toma en cuenta esta teoría: el artículo llamado *Semi-Autonomous Intersection Management*. En él se introduce un nuevo protocolo del modelo multiagente llamado: semi-autónomo. Los autores llaman así al modelo utilizado en los automóviles que cuentan con una autonomía limitada de conducción y que carecen de comunicación con la red total. Pese a que este tipo de autos no son completamente autónomos, son capaces de seguir un número limitado de trayectorias preestablecidas. La simulación se llevó a cabo en intersecciones y demostró que los tiempos de espera entre los autos semiautónomos se redujeron de manera importante con respecto a los manejados por seres humanos (Au et al., 2015). Con lo cual se demuestra una vez más que los sistemas cooperativos mejoran los tiempos de espera.

Como una idea del uso de las simulaciones para valorar

el impacto que conlleva el utilizar objetos para realizar mejoras en el flujo del tráfico vehicular tales como los semáforos inteligentes se tiene el trabajo elaborado en *Knowledge Based Agent for Intelligent Traffic Light Control – An Indian Perspective* publicado en el año 2012; en el cual se describe el uso de agentes para una simulación de control de semáforos. Un sistema en el que interactúan los agentes y su entorno: carreteras, automóviles y semáforos. El objetivo del proyecto es que los agentes tengan la posibilidad de observar el congestionamiento del flujo vehicular, y que con ello infieran una acción en el controlador de los semáforos con el objetivo de gestionar de una manera más eficiente, el tráfico cerca del cruce (Mandava et al.). Con el resultado del experimento se concluyó que con el control inteligente de los semáforos se podía reducir el tiempo de espera y brindar una mayor eficiencia del flujo vehicular. Adicionalmente, éste es un proyecto implementado en NetLogo.

Finalmente, se tiene otro ejemplo de esfuerzo en aras de la optimización en el flujo vehicular el cual se presenta en la publicación *Reconciling Strategic and Tactical Decision Making in Agent-Oriented Simulation of Vehicles in Urban Traffic* del año 2011 en la cual los autores proponen utilizar dos enfoques distintos para la etapa de planeación de tráfico urbano. Ellos proponen que el proceso de planeamiento debe dividirse en las etapas: estratégica y táctica. En la etapa estratégica se definen las características básicas de los agentes, es decir, la ruta óptima de los automóviles definiendo un punto de inicio y un destino. Por su parte, en la etapa táctica se establecen características más dinámicas como la regulación de la velocidad y los cambios de vía según sea posible. En la etapa estratégica, el modelado de la ruta más corta se implementó en base al conocimiento práctico de la red vial. En la etapa táctica, los autores aplicaron técnicas de reforzamiento de aprendizaje en los agentes para simular un comportamiento más real (Fiosins et al.). En la publicación se presentan algoritmos complejos que demuestran cómo la colaboración de los automóviles bajo estos enfoques pueden mejorar el flujo vehicular en una red urbana. Según el artículo, el modelo demostró ser efectivo pues evidenció un crecimiento en la experiencia de cada agente y cooperación entre ellos, lo cual redujo tiempos de llegadas

y congestiones. Los autores planean trabajar en el futuro con mejoras al modelo como por ejemplo: implementar regulaciones centralizadas, mejorar la estructura de los agentes para lograr una cooperación más flexible entre ellos en ambas fases y simplificar la complejidad de sus algoritmos de simulación.

3. Problema

NetLogo es un entorno programable orientado al modelado de sistemas multiagentes que, por su versatilidad, es utilizado para simular fenómenos naturales y sociales que pueden cambiar en el tiempo. Como parte de su repertorio de modelos, NetLogo cuenta con varias representaciones de automóviles y vías básicas que incluyen elementos como semáforos, calles, avenidas y congestiones durante la luz roja de los semáforos, entre otros; sin embargo, ninguna de estas es particularmente precisa con respecto a los factores que influyen en la simulación. Por ende, los modelos presentados en NetLogo son una base importante que requieren de algunos refinamientos antes de ser tomados como simulaciones 100 % realistas de tráfico vehicular.

De esta forma, en el presente proyecto se pretende utilizar dicha plataforma para simular una configuración vehicular típica adaptando nuevos componentes a uno de los modelos ya existentes en dicho ambiente, de manera que sea posible contrastar la influencia de las modificaciones en los datos resultantes. Es importante destacar que los modelos que se proponen a continuación se desarrollaron sin la validación de ningún dato; es decir, no se realizaron mediciones de tiempo en calles reales con el fin de evaluar que los resultados se ajusten a la realidad. Por ende y debido a su complejidad, estas simulaciones al igual que las de NetLogo, no dejan de ser aproximaciones al sistema real. No obstante, esto no quiere decir que los resultados no sean del todo creíbles pues el proyecto toma como referencia una simulación preestablecida de NetLogo y desarrolla los nuevos modelos a partir de la misma. Con lo cual, las conclusiones alcanzadas sólo son aplicables dentro de este contexto.

3.1. Conceptualización

Como primer punto, el proyecto tendrá dos agentes primordiales: los automóviles y los peatones, además de objetos como calles, avenidas, pasos peatonales y semáforos. Inicialmente, estos serían los únicos dos agentes que se implementen en la simulación, sin embargo, queda abierta la posibilidad de agregar nuevos agentes como: distintos tipos de vehículos (motocicletas, ambulancias, autobuses, entre otros), distintos tipos de conductores (pasivos o agresivos), semáforos inteligentes (pasaría de ser un objeto a un agente activo), personas con distintas características físicas (personas con discapacidades físicas, madres cruzando calles con sus hijos, entre otros) y algún otro elemento que ayude en un modelado más real del sistema y que influya directamente sobre la trayectoria fluida del tráfico. El comportamiento de los agentes descritos corresponderá a lo siguiente:

- **Peatones:** se deberán movilizar sólo por las aceras y pasos peatonales (en caso de que deseen cruzar una calle). Para esta entrega, los peatones tendrán interacción solamente con los automóviles, ya que no se implementará pasos peatonales con semáforos; por lo tanto, cruzar las calles dependerá únicamente del flujo vehicular.
- **Vehículos:** cuentan con vías (calles y avenidas) de un solo sentido dentro de las cuales se pueden movilizar a una velocidad constante siempre y cuando no existan obstáculos (luces rojas o peatones). En esta primera entrega se pretende modificar el proceso estático de creación de automóviles con el fin de implementar un modelo más dinámico que permita variar la cantidad de autos dentro de la simulación a distintas horas del día (aumentar en horas con más afluencia de autos y disminuir en los lapsos intermedios). De esta forma, la simulación estará expuesta a diferentes tipos de congestiones determinadas aleatoriamente por las nuevas condiciones que se agregarán a la simulación. Adicionalmente se puede pensar que, en futuras entregas, los vehículos también podrían interactuar (además de con los semáforos) con personas que decidieron no cruzar por pasos peatonales, de manera

que el modelo se apegue más a la vida real. Así mismo, se podría implementar un modelo de *tipos de conductores*, en el cual, éstos analicen las ventajas y desventajas de cambiar de velocidad si la vía se encuentra disponible para hacerlo.

De esta forma, al crear dos tipos de agentes con comportamientos distintos es posible experimentar, de primera mano, relaciones existentes entre ambos y analizar su interacción durante la simulación. Por otra parte, un elemento que tiene gran relevancia en el modelo son los semáforos. Para la primera parte del proyecto serán diseñados como objetos ligados a un control de tiempo. Sin embargo, también es válido diseñar los semáforos como agentes inteligentes para mejorar el flujo vehicular de una determinada zona. La idea de implementar estos objetos y agentes para la primera etapa del proyecto es establecer un marco básico sobre el cual se pueda crear una simulación más real en futuras iteraciones mediante la inclusión de nuevos elementos. De esta forma, al trabajar con un dominio reducido de agentes, se espera alcanzar una interacción más directa y manejable con este paradigma computacional.

4. Objetivos y cronograma

4.1. Objetivo general

Adaptar el modelo de simulación de tráfico de calles y avenidas que contiene la plataforma NetLogo incluyendo variaciones más realistas para contrastar la cantidad de automóviles en espera de la simulación original con la cantidad de automóviles en espera de la simulación modificada a lo largo de un determinado periodo de tiempo. Además, brindarle al usuario el control de la entrada y salida de automóviles y personas durante la ejecución de la simulación.

4.2. Objetivos específicos

- Agregar pasos peatonales al modelo de simulación, de manera que se puedan representar nuevas condiciones de parada y reducción de velocidad en los automóviles.

- Agregar un modelo de creación y eliminación de automóviles y peatones más dinámico que el implementado por la simulación original que le permita al usuario aumentar o disminuir la cantidad de carros y personas dependiendo de la hora del día.

4.3. Cronograma

- **Semana 10:** Conceptualización del tema.
- **Semana 11:** Representación e inferencia.
- **Semana 12:** Comprensión del modelo a modificar y elaboración de casos de uso para el desarrollo del prototipo.
- **Semana 13:** Desarrollo del prototipo y trabajo en el marco teórico.
- **Semana 14:** Desarrollo del prototipo y trabajo en el marco teórico.
- **Semana 15:** Desarrollo del prototipo y trabajo en el marco teórico.
- **Semana 16:** Validación del prototipo y su descripción en el trabajo de investigación así como la propuesta de un trabajo futuro.
- **Semana 17:** Conclusión del trabajo escrito.

5. Adaptación de la simulación

Para el presente proyecto se pretende utilizar el modelo original de NetLogo llamado *Traffic Grid*, el cual será tomado como referencia y adaptado de acuerdo a los objetivos mencionados anteriormente. Para lograr medir el impacto de los nuevos elementos que se incluirán en la simulación se tomarán en cuenta las siguientes variables:

- Cantidad de autos en espera.
- Velocidad promedio de los autos.
- Promedio de tiempo de espera de los autos.

Estos parámetros variarán de acuerdo al estado de los semáforos y la cantidad de automóviles y peatones en un momento determinado durante la simulación. De esta forma se intentará cuantificar el comportamiento de los autos ante nuevas situaciones y comparar los resultados entre dichas simulaciones.

6. Propuesta: peatones

El primer punto a tratar será la creación de peatones y pasos peatonales en la simulación. Para ello es necesario no solamente definir una nueva raza en NetLogo, sino además reestructurar la composición original de vías con el fin de crear zonas en las cuales los peatones puedan moverse libremente y cruzar a través de las calles y avenidas. La idea de crear o definir *patches* como aceras es limitar el movimiento de los peatones para que no ocurran cruces aleatorios de forma incontrolada y, de esta forma, simplificar la interacción entre los agentes.

De la misma forma, se deben incluir eventos para controlar el comportamiento aleatorio de las personas dentro de la simulación así como los cruces.

6.1. Desarrollo, prueba y validación

A continuación se describen en detalle las características más importantes que se implementaron en los nuevos agentes y los procedimientos para controlar las situaciones mencionadas anteriormente.

6.1.1. Objetos y agentes

Se agrega la raza *peatón* que tendrá los siguientes atributos:

- **Velocidad de desplazamiento:** indica la velocidad del peatón dentro de la simulación (es constante mientras se encuentre en el mundo pero distinta para cada agente).
- **Tiempo de caminata:** determina cuánto tiempo caminará libremente el agente antes de tomar la decisión de cruzar la calle.
- **Cruce:** controla el cruce de calles de los peatones mediante tres valores numéricos (0, indica que el

peatón anda caminando por la acera y aún no se dispone a cruzar alguna calle; 1, indica que el peatón ha llegado a un paso peatonal; 2, indica que el peatón se dispone a cruzar la calle y 3, indica que el peatón se encuentra cruzando la calle).

Además, es necesario modificar los atributos originales de los *patches* para agregarles el atributo *tipo*, el cual permite que los agentes distingan entre las calles, aceras y pasos peatonales.

Del mismo modo, se agregan *puntos de espera* junto a cada *patch* de tipo *paso peatonal*, esto con el fin de que los agentes peatones puedan cruzar las calles solamente a través de estas zonas. La idea es que cuando un peatón agote su *tiempo de caminata* y se posicione sobre uno de estos puntos, el atributo *cruce* de los agentes modifique su valor indicando que la persona está dispuesta a cruzar la calle y este cambio eventualmente activará el evento de cruzar la calle (la explicación de la implementación de este proceso mostrará más adelante). En resumen, *los puntos de espera* son la conexión entre los pasos peatonales y las aceras y pueden utilizarse en futuras implementaciones para lograr que los peatones interactúen con los autos en esta zona. En esta primera entrega no se implementa dicha funcionalidad; sin embargo, la idea de un *puntos de espera* puede utilizarse para mantener a un peatón en la acera hasta que sea seguro cruzar. El número de peatones y el tiempo de cruce de los mismos estarán determinados por variables globales definidas por el usuario. El *tiempo de cruce* se utilizará para determinar el momento en el que el individuo debe cruzar una calle.

La creación de los peatones se realiza solamente sobre los *patches* identificados como aceras. En el momento de la creación se les asigna una *velocidad de desplazamiento* aleatoria y un *tiempo de caminata* aleatorio dentro del rango de tiempo para cruzar definido por el usuario.

6.1.2. Configuración de los nuevos elementos

En la configuración inicial se debe establecer el valor de *aceras* para cada rectángulo café de la simulación al momento de dibujarlos. Esto se realiza utilizando el atributo *tipo* de cada *patch*. De esta forma

se establece el ámbito de movimiento de los peatones. De la misma forma, se agregan los pasos peatonales sobre las vías (utilizando el atributo *tipo* de cada *patch*).

6.1.3. Acciones de los agentes

Las acciones de los nuevos agentes se dividen esencialmente en tres:

- **Mover peatones:** los peatones cuentan con un atributo llamado *tiempo de caminata*, el cual se incrementa con cada avance de los agentes. Por otra parte, existe una variable controlada por los usuarios llamada *tiempo para cruzar*. A partir de estos dos parámetros el método se encarga de que cuando el *tiempo de caminata* sea menor que el *tiempo para cruzar*, los agentes ejecuten el procedimiento caminar; de lo contrario, si el agente se encuentra en un *punto de espera*, se ejecuta el procedimiento cruzar la calle. Si el peatón no se encuentra en un *punto de espera* y su *tiempo de caminata* se venció, el método obliga al agente a buscar el punto de espera más cercano a su posición con el fin de disponerlo a cruzar.
- **Caminar:** este método se encarga de controlar que los peatones se desplacen solamente por las aceras; de lo contrario, se rectificará el rumbo de los mismos para posicionarlos sobre los *patches* que cuenten con el tipo correcto: acera o punto de espera. Cada movimiento de los agentes *personas* incrementará su atributo *tiempo de caminata*.
- **Cruzar la calle:** este procedimiento controla las fases del cruce de calles de los peatones. Si el atributo *cruce* tiene el valor de 1 (establecido cuando método *mover personas* obliga a un agente a dirigirse a un *punto de espera*), se procede a ubicar al agente en el paso peatonal más cercano y cambiar el valor de cruce a 2. Posteriormente, cuando el agente se encuentre en la fase 2 del cruce, se rota la figura para alinearla con el paso peatonal de la simulación y se pasa a la fase 3. En la última etapa, el agente finalmente cruza la calle, se reinician sus atributos *cruce* y *tiempo de caminata* y vuelve a iniciar el ciclo.

6.2. Experimentación y análisis

Una vez implementados los elementos descritos en las secciones anteriores, es posible realizar un contraste de los valores obtenidos en ambas simulaciones para observar qué tan significativas son las diferencias entre los comportamientos de los automóviles. El tiempo elegido para ejecutar ambas simulaciones es de treinta segundos debido a que, aunque éstas no dejan de ser una aproximación de la realidad, la validación de la simulación no está basada en variables del comportamiento real del tráfico, por lo que el tiempo seleccionado no es un factor determinante para realizar la comparación. De igual forma, se decidió efectuar las simulaciones en base a este tiempo ya que la simulación original muestra patrones definidos de comportamiento en sus agentes los cuales se mantienen en el tiempo (lo que sucede en los primeros segundos se repetirá en los siguientes y así sucesivamente).

6.2.1. Resultados simulación original

Con el objetivo de crear un marco de referencia se ejecutó la simulación original con los siguientes valores:

- **Grid size x:** 5.
- **Grid size y:** 5.
- **Num cars:** 200.
- **Power:** On.
- **Ticks per cycle:** 20.
- **Current auto:** On
- **Current phase:** 0%.

Estas cantidades las asigna el programa por defecto al iniciar la simulación original. Se utilizaron estos valores para demostrar neutralidad dentro del experimento. En las figuras 1, 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos con la simulación original.

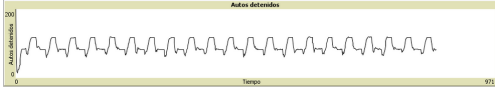


Figura 1: Gráfica de autos detenidos durante treinta segundos en la simulación original.

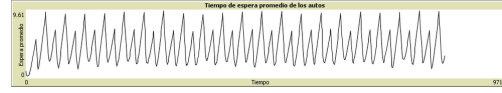


Figura 3: Gráfica de tiempo promedio de espera de los autos durante treinta segundos en la simulación original.



Figura 2: Gráfica de velocidad promedio de los autos durante treinta segundos en la simulación original.

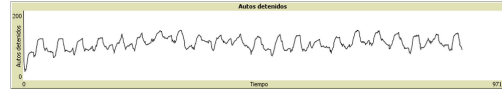


Figura 4: Gráfica de autos detenidos durante treinta segundos en la simulación modificada.

6.2.2. Resultados simulación modificada

Una vez obtenidos los resultados del modelo original, se continuó con la ejecución de la simulación con los nuevos elementos. Para las variables descritas en la simulación anterior se mantuvo el valor utilizado, y los valores asignados a las nuevas variables incluidas en la simulación modificada, fueron los siguientes:

- **Número de personas:** 100.
- **Tiempo para cruzar:** 300.

El número de peatones se escogió tomando en cuenta no saturar el mundo con este tipo de agente, y el tiempo escogido para que los peatones decidieran cruzar alguna calle, se seleccionó teniendo en consideración un equilibrio en el que los peatones no cruzaran la calle tan seguido, ni que esperaran demasiado en realizar el cruce, esto debido al corto lapso de tiempo en el que se desarrolla la muestra. En las figuras 4, 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos con la simulación modificada.

6.2.3. Análisis de los resultados

En la primera simulación se puede notar que las gráficas muestran un comportamiento periódico, el cual está determinado por el funcionamiento constante de los semáforos. Es decir, cada incremento en el número de autos en espera se debe a un cambio de la luz verde a la roja en la simulación. Esto concuerda con el modelo original en el sentido de que el comportamiento de los autos no están influenciado por

ningún otro agente externo que cambie aleatoriamente. En la gráficas producto de la simulación con modificaciones se puede visualizar que el comportamiento general no es periódico, en otras palabras, se presentan variaciones en el número de autos detenidos, su velocidad promedio y su tiempo de espera promedio. Estos resultados coinciden con lo esperado pues en la simulación modificada, los peatones incrementan las presas al comportarse aleatoriamente influyendo en el tráfico fluido de los agentes automóviles.

7. Propuesta: modelo dinámico

Con el nuevo agente implementado en el punto anterior, la simulación ha logrado alcanzar un nivel un poco más alto en cuanto a realismo se refiere. Sin embargo, ningún sistema realista de simulación de tráfico vehicular contemplaría la idea de mantener la misma cantidad de automóviles y peatones durante toda la simulación. Es evidente que durante el día existen fluctuaciones en cuanto al número de autos y peatones dentro de un sistema vehicular, esto influye directamente sobre las estrategias de reducción de congestiones, sincronización de semáforos e inclusive sobre las observaciones que se realicen sobre un determinado modelo. Es por esta razón que se decidió implementar como segundo objetivo, un modelo más dinámico de incremento y decremento de autos y peatones tomando como base la simulación ya conocida; de esta forma la simulación será más versátil y podrá acercarse un poco más a un sistema confiable. Para lograr un modelo más dinámico se implementaron dos



Figura 5: Gráfica de velocidad promedio de los autos durante treinta segundos en la simulación modificada.

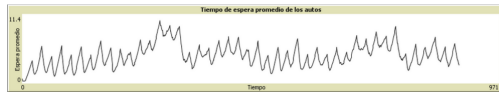


Figura 6: Gráfica de tiempo promedio de espera de los autos durante treinta segundos en la simulación original.

opciones dentro de la simulación que el usuario podrá seleccionar mediante un interruptor. Las opciones se denominan de la siguiente forma: *predeterminada* y *controlada por el usuario*.

7.1. Desarrollo, prueba y validación: simulación predeterminada

Este modo está diseñado para simular las horas de mayor y menor afluencia de autos y peatones automáticamente. Cuenta con un monitor para comprobar las horas del día y de acuerdo a él se incrementa o decrementa automáticamente el número de autos dentro de la simulación. Para ello se diseñó el modelo de la siguiente manera (es importante mencionar que los valores que se indican a continuación se seleccionaron de manera arbitraria pues ésta simulación es una ejemplificación de lo que se puede lograr con el modelo dinámico de autos y peatones; posteriormente estos valores pueden ser revisados y reemplazados sin afectar el trasfondo del ejercicio): la simulación empieza a las 5 a.m. y el monitor de horas se incrementa cada 55 *ticks* (unidades de tiempo utilizadas por NetLogo para actualizar las acciones de los agentes). Este modo acaba cuando no existen autos dentro del mundo. Una vez que la simulación alcanza las 24 horas, el monitor de horas vuelve a inicializarse y reproducirá una nueva simulación (siempre y cuando existan automóviles dentro). Además, el modelo se programó de manera que durante toda la simulación los autos ingresen y salgan de la simulación; sin embargo, durante ciertos lapsos preestablecidos del día, los incrementos serán más altos que los decrementos

y en otros lapsos ocurrirá lo contrario. Todos estos ingresos y salidas de autos se realizarán aleatoriamente para incrementar el realismo del sistema. Básicamente lo único que está definido arbitrariamente son los límites máximos para los incrementos y los lapsos del día, los cuales se describirán a continuación:

- Desde las 5 a.m. y hasta las 9 a.m. se dará un incremento mayor de autos y personas simulando el inicio de la jornada laboral de un día regular de trabajo.
- Desde las 9 a.m. y hasta las 12 m.d. se dará un incremento menor de autos y personas, de manera que saldrán más, simulando la primera mitad de la jornada laboral.
- Desde las 12 m.d. y hasta la 1 p.m. se dará un nuevo incremento de automóviles y peatones para simular la hora de almuerzo de las jornadas laborales típicas. Es importante mencionar que este incremento en particular es distinto al primero pues, en la vida real, la afluencia de dichos agentes es distinta en ambos periodos.
- Desde las 1 p.m. y hasta las 5 p.m. se dará otro decremento de agentes en el mundo, simulando la segunda mitad de la jornada laboral.
- Desde las 5 p.m. y hasta las 6 p.m. se volverá a incrementar la cantidad de peatones y automóviles de la simulación para representar el final de la jornada regular de trabajo.
- Y, finalmente, desde las 6 p.m. y hasta las 12 m.n. se dará un decremento (nuevamente menor al de otros periodos) de dichos agentes para simular la conclusión del día.

7.1.1. Experimentación y análisis

Para observar la ejecución de la simulación descrita anteriormente, primero se debe seleccionar *On* en el switch de *simulación predeterminada* en la interfaz de usuario. Luego, si se desea, se pueden establecer los valores de la configuración inicial como la cantidad de personas y autos. Se debe tomar en cuenta

que si se ingresa una gran cantidad de agentes al inicio se puede saturar el mundo durante las horas pico, ya que se genera una presa en la cual se siguen creando agentes sin salida de los mismos, lo cual satura el sistema. Por lo anterior, se recomienda mantener la configuración predeterminada o establecer la cantidad de autos en un rango de 0 a 150, y personas en un rango de 0 a 100 para tener una visualización más clara cuando se realiza un aumento o disminución de las mismas. De lo contrario, se sugiere incrementar el tamaño del mundo para trabajar con cantidades mayores de agentes. Por último, se acciona el botón *Setup* y *Go*. En la figura 7 se muestran los controles y monitores con la configuración predeterminada.

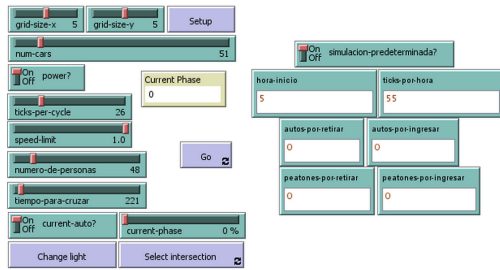


Figura 7: Controles de la simulación inicializados con los valores predeterminados.

Tal y como se puede apreciar, el monitor de *hora-inicio* se establece automáticamente a las 5 de la mañana y la cantidad de *ticks* que marcan una hora es de 55. Una vez que se ejecuta la simulación se pueden visualizar los lapsos de incrementos o decrementos de los agentes según las horas pico. Por ejemplo, una ejecución aleatoria de la simulación con los parámetros predeterminados, mostraría un escenario similar al presentado en la figura 8 a las 5 a.m.

A partir de ese momento comienza el primer lapso de hora pico hasta las 9 a.m., esto se puede apreciar en la imagen 9.

En el siguiente lapso, simulando la primera mitad de la jornada laboral, la cantidad de agentes comienza a disminuir. Esta situación se puede visualizar en la figura 10.

Estas representaciones ejemplifican el comportamiento de los agentes en la simulación dependiendo de la hora del mundo de manera gráfica (este mismo

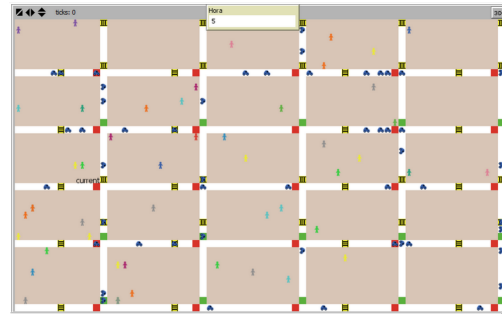


Figura 8: Mundo a las 5 de la mañana en la simulación predeterminada.

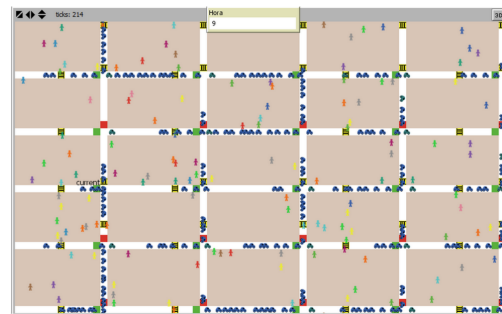


Figura 9: Mundo a las 9 de la mañana en la simulación predeterminada.

comportamiento se repite en la segunda mitad del día con ciertas variaciones, no se incluyeron en el presente proyecto para evitar caer en la redundancia). Sin embargo, para tener una visión más general de este dinamismo, es necesario analizar las gráficas que marcan el comportamiento de los agentes respecto a la cantidad de autos detenidos, su velocidad promedio y tiempo de espera promedio de la misma forma en como se realizaron los experimentos en el objetivo anterior. La medición de estas variables se realizó durante un día completo en el mundo de NetLogo. Es importante tener en cuenta que, en este punto, ambas simulaciones ya no son equivalentes, pues existen varios factores que influyen en las variables que se desean contrastar. No obstante, la comparación es igualmente importante para validar que el modelo se está ejecutando de la forma esperada.

Con la gráfica de la figura 11 se tiene que a los 27 *ticks*, es decir, aproximadamente a las 5:30 de la

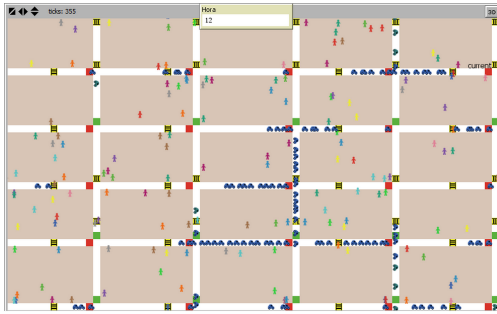


Figura 10: Mundo a las 12 medio día en la simulación predeterminada.



Figura 11: Gráfica de promedio velocidad de los autos hasta las 12 am en la simulación predeterminada.

mañana (recordar que 55 *ticks* equivalen a una hora) la velocidad promedio fue de 0.24, y a los 165 *emph-ticks*, o sea, a las 8 a.m. (hora intermedia del lapso de la hora pico de la mañana) el promedio de velocidad fue de 0.14, con lo que se observa que la velocidad de los autos comenzó a disminuir en este lapso debido al aumentar el número que agentes que intervenían en la simulación. Este mismo comportamiento, tal y como se puede apreciar en la gráfica de velocidad promedio, ocurre durante el día en NetLogo. Acercándose al final de la gráfica, se aprecia que hay un aumento en el promedio de velocidad. Esto se debe a que, después de la última hora pico (aproximadamente a las 7 p.m.), el número aleatorio para la salida de agentes es mayor que el de entrada de los mismos, ya que cerca de medianoche existe una disminución considerable de los agentes simulados en la vida real.

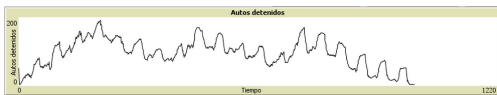


Figura 12: Gráfica de autos detenidos hasta las 12 am en la simulación predeterminada.

En la gráfica de la figura 12 se puede visualizar que durante la ejecución existieron tres aumentos signifi-

cativos de autos detenidos, esto sucedió en los lapsos de mayor cantidad de autos y personas en la simulación, es decir, durante las horas pico, tal y como se esperaba.

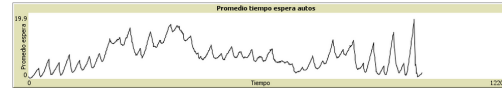


Figura 13: Gráfica de promedio de tiempo de espera de los autos hasta las 12 am en la simulación predeterminada.

Con la gráfica de promedio de espera de los autos en la figura 13 se puede observar cómo en las horas con más afluencia de autos se suele dar un mayor tiempo de espera para movilizarse, esto debido a la mayor cantidad de autos y peatones saturando las vías. Por ejemplo a las 9 a.m., el mundo aún cuenta con los agentes ingresados en la primera hora pico, por lo que el promedio de espera es de 10.79; mientras que a las 10 a.m. (lapso donde disminuye la afluencia de agentes), el promedio cae a 7.05. De esta manera se puede apreciar cómo las gráficas concuerdan con lo planteado en la propuesta del modelo dinámico.

7.2. Desarrollo, prueba y validación: simulación controlada por usuario

La simulación predeterminada permite tener un modelo de generación de autos y peatones más dinámico que el original; sin embargo, esto no es suficiente como para considerar el sistema realista. Esto se debe a que los parámetros justificados en el punto anterior son válidos como ejemplificación del concepto; no obstante, estos parámetros no son ni mucho menos universales. Por lo tanto, en este sentido, es necesario contemplar un modelo con menos limitaciones y más personalizable por el usuario que permita emular distintas jornadas laborales e incrementos y decrementos de los agentes de manera más libre. Es por esta razón que se decidió implementar la segunda parte de este modelo dinámico, para que el usuario pueda imponer sus propias condiciones y adaptar la simulación a sus necesidades. La segunda parte se diseñó de la siguiente manera: el usuario podrá elegir la cantidad de *ticks* por hora. Así, el tiempo pasará

de acuerdo a lo establecido en este parámetro, lo cual permitirá alargar o acortar simulaciones según la persona lo indique. Igualmente, el usuario tendrá la posibilidad de elegir la hora de inicio de la simulación; a diferencia de la personalizada que siempre empezaba a las 5 a.m., en éste modelo, el usuario, si lo desea, puede iniciar la simulación a la hora que considere más conveniente para él. Durante la simulación, la cantidad de automóviles y peatones será constante. Es decir, el número de agentes que se crean al iniciar la simulación se mantendrá mientras el usuario no intervenga. De esta forma se asegura neutralidad de parte de la simulación, de modo que sea el usuario el único que dicte las fluctuaciones del tráfico.

Ahora, la parte más importante del modelo es que el usuario cuenta con una interfaz que le permite agregar y retirar peatones y autos a la simulación en tiempo real. De esta forma él podrá controlar todos los cambios para hacerlos coincidir con un modelo real que se desee analizar. Es importante mencionar que entre ambos modelos existe una diferencia considerable. En la simulación controlada por el usuario el ingreso de los autos y peatones se realiza de forma inmediata; es decir, en el mismo *tick* se crean o destruyen los agentes que el usuario desee. Sin embargo, en la simulación predeterminada el incremento o decremento de agentes se realiza de manera continua durante un periodo predeterminado de tiempo, lo cual le añade realismo. La idea detrás de este punto es que el realismo de la simulación controlada por el usuario dependerá por completo de él mismo, ya que la manera en cómo se ingresan o retiran agentes en ambos modelos no son equivalentes. No obstante, esto puede ser imitado si se realizan incrementos o decrementos leves durante un periodo de tiempo prolongado.

La interfaz de usuario mantiene los controles de la simulación base; sin embargo, también se incluyeron entradas para la ingresar y retirar agentes, los cuales se colocaron a la derecha de los originales.

Para que el usuario tenga el control del dinamismo de agentes se elige la configuración inicial con los controles del lado izquierdo (entre ellos: número de personas y el tiempo que tienen para cruzar), se selecciona *Off* en el interruptor que determina si la simulación es predeterminada o no y se presiona el

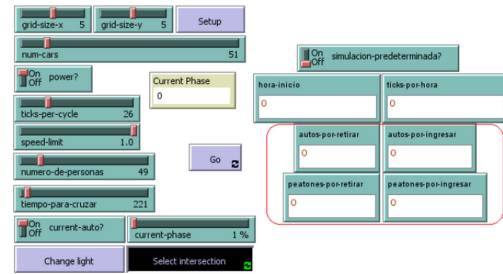


Figura 14: Controles para ingresar y retirar agentes en la simulación.

botón *Setup*. Se establece la cantidad de *ticks* por hora y la hora del día en que dará inicio la simulación y por último se acciona el botón *Go*. Durante la simulación es cuando el usuario modifica las entradas y salidas con los controles señalados en rojo en la figura 14.

7.2.1. Experimentación y análisis

Un ejemplo del impacto del manejo del dinamismo de agentes por parte del usuario se puede visualizar en las figuras 15, 16, 17 y 18, las cuales se explicarán a continuación.

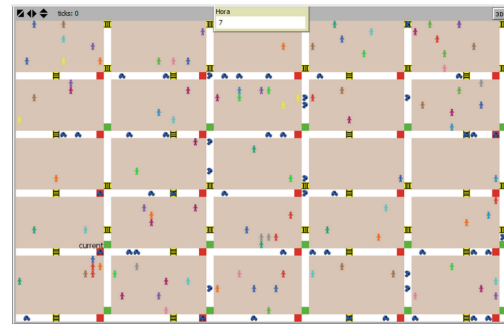


Figura 15: Configuración inicial de la simulación con 150 peatones, 50 automóviles y 100 *ticks* por hora.

La configuración del mundo en la ejecución presentada con la figura 15, fue con 150 peatones, 50 automóviles y 100 *ticks* por hora. La gráfica del promedio de velocidad de los autos en 30 segundos se muestra en la figura 16.

Si el usuario decide ingresar, por ejemplo, 100 vehículos más y retirar 50 personas durante la ejecu-



Figura 16: Velocidad promedio de los automóviles de la simulación controlada por el usuario.

ción, entonces el mundo cambia gracias a estos nuevos parámetros. El ejemplo anterior se puede visualizar gráficamente en la figura 17.

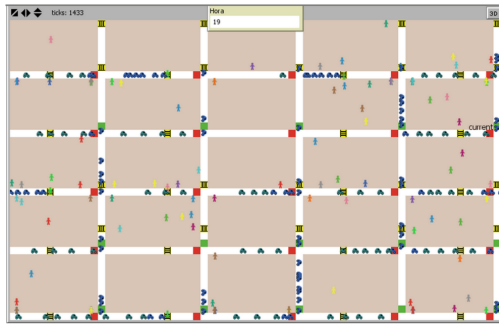


Figura 17: Estado de la simulación luego de incluir 100 vehículos y retirar 50 personas.

Justo en ese instante la gráfica mostró un impacto considerable en la velocidad de los autos evidenciando un comportamiento distinto al presentado al inicio de la ejecución (esto se puede apreciar aproximadamente desde la mitad de la gráfica hasta el final en la figura 18).



Figura 18: Velocidad promedio de los automóviles de la simulación controlada por el usuario luego de incluir y retirar agentes.

Con el ejemplo anterior, se pretende que mostrar cómo el usuario tiene la posibilidad de hacer uso del modelo simulando el tráfico con los datos que él mismo seleccione. De esta forma se abre la posibilidad de que, si el usuario tiene a su disposición mediciones de cantidad de automóviles y personas durante lapsos del día, pueda ingresarlos al modelo y realizar análisis sobre los mismos.

8. Importancia de los resultados obtenidos

La importancia de los datos obtenidos radica principalmente en el uso que se les puede dar, por lo que para entender mejor el modelo y conocer de qué manera pueden ser utilizados, es necesario saber cómo se registra cada resultado en las gráficas disponibles. La gráfica de autos detenidos se modifica respecto a la variable *num-cars-stopped*, la cual se actualiza en cada *tick* con la cantidad de autos detenidos en ese instante. El dato obtenido puede ser utilizado por ejemplo, para identificar la cantidad de dióxido de carbono emanado por unidad de tiempo en la ciudad simulada producto del congestionamiento, el cual provoca que más autos estén detenidos (momento en el que se emana más dióxido de carbono).

La gráfica de promedio de velocidad de los autos obtiene el promedio de la variable *speed* de los autos. Esta variable es la que representa la velocidad y es inicializada y actualizada con cero cuando el auto está detenido. Y cuando el auto está en movimiento se actualiza respecto a una condición: si al frente hay un automóvil se autoasigna la velocidad de ese auto y se desacelera una cantidad fija que fue establecida al inicio de la ejecución; y sino, la velocidad aumenta esa misma cantidad preestablecida pero siempre respetando el límite de velocidad. Ahora bien, con los datos obtenidos con este gráfico se puede por ejemplo, simular un sólo tipo de auto con un límite de velocidad como el establecido, con aceleración y desaceleración predefinida y fija.

La gráfica del promedio de tiempo de espera utiliza el promedio de la variable *wait-time* de los automóviles. Éste atributo se inicializa con cero y se actualiza en cada *tick* ya que cada carro acumula una unidad por *tick* mientras esté detenido. Este dato es útil para medir el grado de congestionamiento en la ciudad completa que se está simulando. Por último, se debe recordar que todos estos datos que se registran pueden derivarse de las cantidades de agentes ingresados por el usuario durante la ejecución, por lo que se puede simular horas pico (como el ejemplo proporcionado) y congestionamientos en pasos peatonales sin semáforos donde hay mucha o poca afluencia

de personas en un entorno en el que los conductores siempre deciden dar paso a los peatones que deseen cruzar por medio de estos pasos peatonales. Se debe tomar en cuenta que se tiene la posibilidad de exportar los datos de cada gráfico por aparte, en donde se registra el dato obtenido por cada *tick* (ya que el eje x de la gráfica utiliza los *ticks* como unidad de tiempo en todas las gráficas de esta simulación).

Por último, para la utilización de la simulación en general, se debe tocar dos puntos importantes a considerar:

- El tamaño del mundo permite que en cada cuadra pueda haber catorce carros aproximadamente, por lo que si se desea simular calles más largas se deben ajustar las dimensiones en la configuración.
- La cantidad de *ticks* elegidos para simular una hora influye significativamente en los datos obtenidos respecto al tiempo, ya que la luz en rojo actualmente dura aproximadamente 20 *ticks* y un auto recorriendo toda una cuadra alrededor de diez *ticks*, entonces, dependiendo de los tiempos y dimensiones a escala de la calle o avenida que se quiera simular se debería realizar el cálculo de cuánto es una hora de la vida real en *ticks*.

9. Problemas abiertos y problemas futuros

El problema del realismo de la simulación vehicular es un problema abierto debido a su gran complejidad y al número elevado de variantes que influyen en un sistema como este. En el presente proyecto, aún quedan muchas mejoras por realizar: desde agregar nuevos objetos y agentes (agregar calles de doble vía, objetos que mejoren el paisaje como estaciones para autobuses, edificaciones, árboles, entre otros) hasta mejorar los elementos ya implementados (incluir distintas personalidades para los conductores que no siempre respeten las leyes de tránsito o que modifiquen su modo de conducción durante la simulación, distintas características físicas de los autos para representar autobuses por ejemplo, y distintas carac-

terísticas físicas y de personalidad para que los peatones no se comporten siempre de la misma forma, entre muchas otras). En fin, la cantidad de variables que se le pueden agregar al problema original pueden incrementarse enormemente dependiendo del grado de precisión que se busque, lo cual lo determinará el usuario, pues al final, el propósito de esta simulación es obtener datos valiosos para realizar análisis en diversos ámbitos.

10. Agradecimientos

Nos gustaría expresar nuestro agradecimiento al profesor Dr. Álvaro de la Ossa Osegueda por su colaboración y guía en todo momento para con este proyecto.

Referencias

- Tsz-Chiu Au, Shun Zhang, and Peter Stone. Autonomous intersection management for semi-autonomous vehicles. In *Handbook of Transportation*. May 2015.
- Julia Camacho. Estudio del uso de sistemas multi-agentes para el modelado del tráfico de autos. *Proyecto de grado - Investigación de operaciones*, 2008.
- Bo Chen, Harry H. Cheng, and Joe Palen. Integrating mobile agent technology with multi-agent systems for distributed traffic detection and management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, page 1–10.
- Arnaud Doniec, Stephane Espie, Rene Mandiau, and Sylvain Piechowiak. Non-normative behaviour in multi-agent system: Some experiments in traffic simulation. *2006 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, a.
- Arnaud Doniec, René Mandiau, Sylvain Piechowiak, and Stéphane Espié. A behavioral multi-agent model for road traffic simulation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, page 1443–1454, b.

- Maksims Fiosins, Jelena Fiosina, Jörg Müller, and Jana Görmer. Reconciling strategic and tactical decision making in agent-oriented simulation of vehicles in urban traffic. *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*.
- V. Mandava, P. Nimmagadda, T. R. Korrapati, and K. R. Anne. Knowledge based agent for intelligent traffic light control – an indian perspective. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence Lecture Notes in Computer Science*, page 491–501.
- Isabel Marti, Vicente R. Tomas, Arturo Saez, and Juan J. Martinez. A rule-based multi-agent system for road traffic management. *2009 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*.
- David Meignan, Olivier Simonin, and Abderrafiâa Koukam. Simulation and evaluation of urban bus-networks using a multiagent approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, page 659–671.
- Luis Oñate. Simulador multiagente de tráfico urbano. *Proyecto Fin de Carrera - Universidad Pontificia Comillas*, 2005.
- Stuart Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA, 3rd edition, 2009. ISBN 0136042597, 9780136042594.
- Ernesto Sanchez, Giovanni Squillero, and Alberto Tonda. Evolving individual behavior in a multi-agent traffic simulator. *Applications of Evolutionary Computation Lecture Notes in Computer Science*, page 11–20.
- Luis Zapata. Sistemas multiagente colaborativos. *Proyecto presentado a la Universidad Eafit para la obtención del título de Ingeniero de Sistemas*, 2010.