

Gradu Amaierako Lana / Trabajo Fin de Grado
Fisikako Gradua / Grado en Física

Simulación Del Tráfico De Entrada Al Campus De Leioa-Erandio: Análisis Y Solución De Los Atascos

Egilea/Autor:
Ion Mitxelena
Zuzendaria/Director/a:
Iñigo Etxebarria

Abstract

Vehicle traffic is a physical problem in which a large number of different bodies interact. The CA or “Cellular Automata” models are a reference solving these problems because of their efficiency. In this paper we study the behavior of free traffic with CA-184 and DFI-TCA models. Later, we present a real problem in order to solve it computationally with an adjusted DFI-TCA model. The results obtained are compared with the expected results, which have previously been obtained in the real system. Finally, we propose and study three different solutions to the problem.

Laburpena

Autoen trafikoa elkar interakzionatzen duten gorputz askoren arteko problema bat bezala agertzen da fisikan. Gaur egun problema hauek konputazionalki aztertzen eta ebazten dira, eta horretan “Cellular Automata” modeloak benetan garrantzitsuak dira. Hasiera batean trafiko librea aztertzen da lan honetan, CA-184 eta DFI-TCA modeloen bitartez. Gero, benetako problema bat aurkeztu eta ebazten da konputazionalki, DFI-TCA-an oinarritutako programa batekin kasu honetan. Azkenik, emaitzak aztertu eta baloratu ondoren, hiru konponbide ezberdin proposatzen eta aztertzen dira.

Resumen

El tráfico de vehículos constituye un problema físico en el cual un gran número de diferentes cuerpos interaccionan entre sí. Los modelos CA o “Cellular Automata” son eficientes en la resolución de estos problemas, y por ello son una referencia en la simulación computacional del flujo de vehículos. En este trabajo se estudia el comportamiento del tráfico libre con los modelos CA-184 y DFI-TCA. Posteriormente se plantea un problema real y se estudia computacionalmente, aunque en este caso sólo con el modelo DFI-TCA, ya que se ajusta mejor al problema en cuestión. Los resultados obtenidos se comparan con los resultados basados en medidas experimentales, los cuales han sido previamente obtenidos en medidas reales del sistema verdadero. Finalmente, se proponen y estudian tres alternativas diferentes al problema.

Índice

1	Introducción	4
2	Modelos “<i>Cellular Automata</i>”	5
2.1	CA-184 o <i>Wolfram’s rule 184</i>	6
2.1.1	Tráfico libre	7
2.2	Fukui-Ishibashi Determinista o DFI-TCA	9
2.2.1	Tráfico libre con velocidad cuantizada	10
3	Desarrollo del trabajo	11
3.1	Planteamiento del trabajo	12
3.2	Primer modelo realista	13
3.3	Segundo modelo: Paso de cebra	22
3.4	Tercer modelo: Autobuses	23
3.5	Alternativas	26
3.5.1	Alternativa A	26
3.5.2	Alternativa B	27
3.5.3	Alternativa C	28
4	Conclusiones	30

1 Introducción

El estudio del tráfico desde un punto de vista científico es un hecho relativamente reciente; puesto que, a pesar de que los primeros estudios comenzaron en el año 1935 (Greenshields), no fue hasta los años 90' cuando con los trabajos de Nagel y Schreckenberg (1992) [1], y de Kerner y Kohnhauser (1993), la ciencia pasó a ser verdaderamente esencial para el tráfico. Hasta esta fecha el tráfico había sido estudiado mayormente desde un punto de vista macroscópico; por ello, el comportamiento del tráfico se estudiaba mediante la teoría de dinámica de fluidos, donde los atascos eran representados como pulsos de ondas. En este campo hay de destacar el modelo presentado por Lighthill y Witham en 1955, el cual tuvo una gran relevancia. Por otra parte, los modelos microscópicos para estudiar el tráfico siempre habían sido considerados realmente complejos y difíciles de tratar; algo que no es de extrañar, ya que se trata de un sistema compuesto por un gran número de cuerpos que interaccionan entre sí, y que normalmente se encuentran en un estado fuera del equilibrio. Sin embargo, el transcurso de los años y el desarrollo de las computadoras fue haciendo posible diseñar modelos microscópicos cada vez más elaborados y complejos, hasta el punto de convertirse en un referente en el día de hoy. Quizás los modelos microscópicos no sean la mejor manera de representar la realidad, pero son realmente útiles debido a su versatilidad, puesto que dan la oportunidad de introducir una cantidad enorme de parámetros y variables, y simular de un modo muy rápido aspectos tan curiosos como la psicología humana en la conducción.

En este trabajo se trabaja con modelos microscópicos basados en la programación “*Cellular Automata*”. Las ideas de esta ciencia empezaron a ver la luz en 1948, cuando Johann Louis von Neumann las utilizó para estudiar procesos biológicos. Sin embargo, fue Stephen Wolfram quién verdaderamente introdujo en el mundo científico los modelos CA por medio de su libro *A New Kind Of Science* [2], en el cual propone y estudia el uso de estos modelos en varias disciplinas científicas, como las matemáticas, la física o la sociología, entre otras. Actualmente existen múltiples estilos y modelos en la aplicación de los modelos “*Cellular Automata*” al estudio del tráfico, aunque todos comparten ciertas características propias del CA. Tal y como se ha comentado anteriormente, en este trabajo son dos los modelos utilizados, CA-184 y DFI-TCA, siendo el segundo el que cobra finalmente más importancia. Ambos modelos son deterministas y unidimensionales, y por supuesto, están íntimamente relacionados entre sí. A continuación se describe de un modo más detallado en qué consisten los modelos CA, así como las variaciones empleadas aquí. Después, se realiza una descripción completa del problema a tratar, y se estudia a fondo la resolución de éste con un modelo DFI-TCA desarrollado para ello. Para terminar, se muestran los resultados y la valoración de éstos desde un punto de vista realista, y se proponen tres soluciones al problema estudiado.

2 Modelos “Cellular Automata”

En esta sección se describe de qué trata la programación CA y sus principales ideas. También se describen los modelos utilizados en este trabajo para la simulación del tráfico. La programación CA tiene dos características fundamentales en la simulación del tráfico y otras aplicaciones, se trata de la discretización del tiempo y del espacio. Estas ideas se describen de forma detallada en la tesis de Javier Novoa Cataño [3]. En estos modelos, así como no ocurre en los modelos macroscópicos, el tiempo y el espacio no se definen de forma continua, sino que sólo toman unos determinados valores, esto es, están discretizados.

En primer lugar, en lo que al espacio respecta, éste se representa como una red generalmente isótropa y homogénea. Esta red puede tener varias dimensiones pero en este trabajo se trata siempre con un modelo unidimensional¹. La red está compuesta por un número finito de celdas totalmente iguales, de modo que éstas forman el entorno físico del problema. Es imprescindible explicar un par de ideas aquí, como lo son la ocupación de una celda y el en torno de una celda. Por una parte, cada celda de la red que forma el sistema puede estar ocupada o libre, de modo que en una celda entra un automóvil o ninguno. Tal y como se explicará más adelante, es muy importante definir de manera acorde con el problema físico que se está estudiando la dimensión real de cada celda, puesto que de ésto dependen parámetros cruciales; por ejemplo, la velocidad de los vehículos en el sistema o las dimensiones reales del sistema. Por otra parte, más adelante se explicará que el movimiento de un automóvil que se encuentra en una determinada celda depende directamente de las celdas que se encuentran a su alrededor; esto es, el estado ocupado o no de las celdas vecinas determina directamente la evolución temporal de una celda del sistema. Por tanto, la descripción del estado de una celda precisa también de la descripción de las celdas vecinas, o en otras palabras, la descripción completa de una celda precisa de la descripción de su entorno.

En cuanto al tiempo, en los modelos CA no se define una evolución temporal continua, sino que ésta se implementa mediante pasos discretos. Pongamos un ejemplo para aclarar la idea. Supongamos que en un instante $t = t_0$ el sistema se encuentra en una determinada configuración, esto es, algunas celdas están ocupadas y otras libres. Hay que implementar la evolución del sistema antes de que el tiempo avance al instante $t = t_0 + 1 = t_1$, donde ya se ha tomado la unidad como paso temporal entre dos instantes en las unidades de CA. Atendiendo a la(s) regla(s) de transición se hacen evolucionar todas las celdas del sistema paralelamente, y una vez hecho ésto se puede decir que el instante $t = t_0$ a terminado, pudiendo dar paso al instante temporal $t = t_1$. Tal y como ocurre con la discretización

¹En la simulación realizada en este trabajo el flujo del tráfico ocurre siempre en un sólo carril, sin adelantamientos, siendo suficiente para ello una única dimensión. Aún y todo la dinámica del tráfico no depende mucho de este hecho, tal y como se ve si se compara con [4].

espacial, también aquí es muy importante determinar de manera adecuada el tiempo real del paso temporal, o en el ejemplo anterior, el tiempo real transcurrido entre los instantes $t = t_0$ y $t = t_1$. Debido a que de esta elección depende directamente la velocidad real de los vehículos del sistema, el estudio del problema real en cuestión es imprescindible para determinar el tiempo correspondiente a un paso temporal en el modelo CA.

2.1 CA-184 o *Wolfram's rule 184*

Por su simplicidad, es importante explicar aquí el modelo desarrollado por Stephen Wolfram en torno a 1983. El modelo CA-184 define celdas binarias, de modo que tan sólo existen dos estados diferentes para cada celda, que esté ocupada o vacía. En lo que al tráfico se refiere ésto se reduce a que sólo existe un tipo de vehículo y que en cada celda sólo entra un vehículo, ni más ni menos. Tal y como se ha dicho antes, la evolución de un vehículo que se encuentra en una determinada celda depende directamente del estado ocupado o no de celdas vecinas. En este modelo es la regla 184 (*Wolfram's rule 184*) la que rige la evolución temporal. Simplemente, un vehículo avanzará a la siguiente celda en el siguiente paso temporal sólo si esta celda se encuentra desocupada. Teniendo en cuenta la regla 184, todos los movimientos posibles de una celda se resumen a ocho casos, tal y como se ilustra en la figura 1.

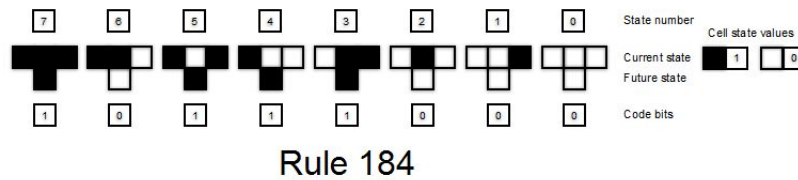


Figura 1: Resumen de las configuraciones posibles en el modelo CA-184. Las celdas blancas están vacías, mientras que el llenado negro indica que la celda está ocupada.

Es obvio que la descripción completa de una celda precisa de sus dos celdas contiguas en este modelo; esto es, una configuración completa se describe con tres celdas vecinas, de hecho, por ello hay $2^3 = 8$ configuraciones en total. Matemáticamente, y para el caso trabajado aquí que es el de las simulaciones de tráfico, la regla 184 se resume como sigue siguiendo la notación de [5].

$$v_i(t) \Leftarrow \min(g_{si}(t-1), 1) \quad (1)$$

$$x_i(t) \Leftarrow x_i(t-1) + v_i(t) \quad (2)$$

La primera expresión dice que la velocidad del vehículo i es el mínimo de 1 y $g_{si}(t-1)$, donde $g_{si}(t-1)$ no es más que la distancia en número de celdas a la celda ocupada más próxima en el instante anterior. Por tanto, esta expresión resume toda la esencia del modelo CA-184, ya que dicta que un vehículo sólo avanza si la celda próxima está libre, de manera que el máximo avance es de una celda. Por otro lado, la segunda expresión es consecuencia de la primera, y expresa que la posición en el sistema del vehículo i en el instante temporal t es la posición de éste en el instante anterior más la velocidad que lleva en ese mismo momento. Antes de terminar con este modelo hay que mencionar dos detalles que tienen importantes consecuencias físicas. Por una parte, la regla 184 no es simétrica. Por ejemplo, supongamos que en un determinado instante una celda está ocupada y que también lo está la celda anterior, pero que la celda próxima está vacía (configuración 110), entonces por la regla 184 se puede decir que en el siguiente instante temporal la celda central estará vacía, ya que el vehículo de ésta se puede mover pero no el de la anterior. En cambio, si se tiene la configuración inversa; esto es, la primera celda vacía y las otras dos ocupadas (configuración 011), en el instante temporal posterior la celda central seguirá ocupada porque el vehículo que ahí se encuentra no se ha podido mover (pues la celda contigua estaba ocupada). En conclusión, en el primer caso la celda central queda vacía, mientras que en el segundo no, lo que verifica la asimetría de la regla 184. Ésto es importante cuando se implementa el modelo, ya que implica que la evolución temporal del sistema debe hacerse paralelamente sobre todas las celdas, porque sino la dinámica del sistema cambia por completo. Por otra parte, cabe destacar la presencia aquí de un fenómeno bien conocido en física del estado sólido, como lo es la simetría partícula-hueco. Los vehículos tienden a avanzar en una dirección siempre que pueden hacerlo, y a su vez, las celdas vacías que se interpretan como huecos tienden a “moverse” en la dirección opuesta, dando la sensación de que se mueven en realidad. Tal y como se verá en secciones posteriores, este fenómeno es importante en el estudio del espacio de fase del sistema, especialmente en configuraciones con una densidad muy alta.

2.1.1 Tráfico libre

Una vez explicado el modelo más simple para las simulaciones de tráfico, es hora de implementarlo para obtener los primeros resultados. El modelo desarrollado aquí hace una simulación del tráfico libre; esto es, es un sistema unidimensional (un sólo carril) en el que simplemente los vehículos avanzan según la regla 184. Además, se trata de un sistema abierto con condiciones periódicas, por lo que cuando un vehículo llega a la última celda del sistema aparece en el siguiente instante por la primera celda, que viene a ser el principio

del sistema. Esta simulación se ha llevado a cabo con un sistema de 300 celdas, con lo cual la capacidad máxima del sistema es de 300 vehículos. Puede parecer que un sistema tan pequeño carece de fiabilidad; sin embargo, las condiciones periódicas hacen que el tamaño no sea tan relevante. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación del tráfico libre mediante el modelo CA-184. Decir que la densidad del sistema se hace variar desde cero hasta uno, que son los valores mínimo y máximo para ésta. Partiendo de una configuración aleatoria se ha realizado la evolución del sistema durante 580 pasos temporales para cada densidad, lo cual es suficiente para que todas las celdas estén ocupadas en algún instante para cualquier densidad. Las medidas del flujo y la velocidad se realizan en una celda arbitraria, lo cual no influye debido a la alta cantidad de pasos temporales de la simulación.

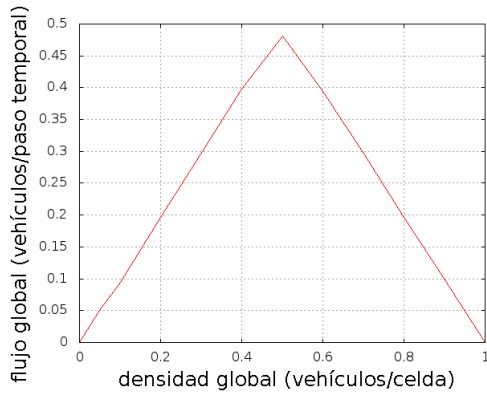


Figura 2: Flujo global vs densidad global en el tráfico libre.

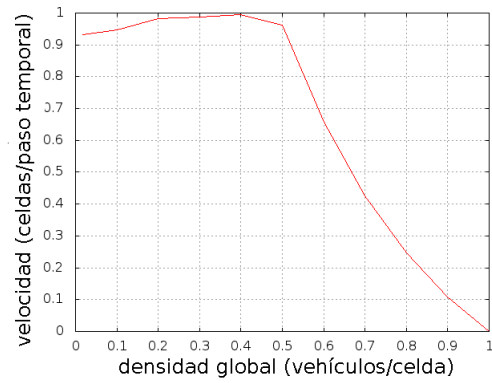


Figura 3: Velocidad media vs densidad global en el tráfico libre.

Los gráficos obtenidos describen de una forma general el comportamiento del tráfico libre. En cuanto al comportamiento del flujo para diferentes densidades, es obvio que hay dos regiones separadas por un punto crítico en las que el tráfico se comporta totalmente diferente. En la primera el flujo del sistema aumenta linealmente con la densidad, esto se traduce en que prácticamente todos los vehículos avanzan en todos los instantes temporales, de modo que aumentando la densidad se mantiene la dinámica del sistema y el flujo aumenta por la mayor presencia de vehículos. En esta zona se presencia un comportamiento estable, por lo que la dinámica del sistema no varía a lo largo del tiempo. Sin embargo, a medida que la densidad alcanza su valor crítico, el cual se encuentra en torno a 0.5 vehículos/celda como muestra el gráfico, el sistema se empieza a desestabilizar y el tráfico deja de ser tan fluido, de manera que aparecen las primeras congestiones locales. Pasado el punto crítico, el flujo disminuye a medida que la densidad aumenta, además, la pendiente es la misma en valor absoluto que la pendiente obtenida en la primera región. En esta región la alta densidad de vehículos en el sistema hace que avanzar sea prácticamente imposible para muchos de ellos, formándose así largas colas de vehículos, o sea, atascos. No es de

extrañar que una vez entrado en esta fase el colapso se agrave a medida que la densidad aumenta, ya que la presencia de más automóviles hace que la probabilidad de encontrar huecos a los que avanzar disminuya. Por otra parte, en lo que al gráfico de la velocidad media respecta, el fenómeno se vuelve a repetir, distinguiéndose una vez más entre dos regiones. En la primera la velocidad media es la máxima² (una celda por paso temporal), puesto que prácticamente todos los coches tienen espacio para avanzar en todo momento. Sin embargo, superado el punto crítico la velocidad comienza a disminuir abruptamente hasta anularse para la densidad máxima, lo que no es de extrañar porque si todas las celdas se encuentran ocupadas no hay manera de avanzar en este modelo. Antes de finalizar con este análisis merece una mención especial el punto crítico del sistema, en el que realmente se experimenta una transición de fase de primer orden, así como se describe en [6] y en [7]. La transición ocurre de manera similar a las convencionales transiciones de fase; por tanto, se puede decir que el tráfico libre corresponde al estado gaseoso y el tráfico congestionado corresponde al estado líquido. Además, tal y como ocurre entre estos dos estados físicos, la transición de fase no es instantánea, sino que hay momentos en los que coexisten los estado gas y líquido. Analogamente, en la simulación del tráfico libre existe un punto en el que localmente se generan atascos, pero éstos no viven mucho tiempo y tampoco forman largas colas; por lo tanto, el sistema se encuentra aquí en un estado metaestable, en el cual el comportamiento del tráfico se considera entre libre y congestionado. La metaestabilidad es una característica propia de las transiciones de fase de primer orden.

2.2 Fukui-Ishibashi Determinista o DFI-TCA

Básicamente el modelo DFI-TCA es una extensión del modelo CA-184 explicado en el apartado anterior. La novedad en este nuevo modelo es que los vehículos tienen una velocidad máxima superior a una celda por paso temporal. En un supuesto caso en el que $v_{max} = 3$ celdas/paso-temporal, siempre que la distancia desde el automóvil hasta el próximo más cercano lo permita su velocidad será la máxima en todo momento. Sin embargo, si sólo hay dos celdas libres entre ambos coches, la velocidad en ese instante del vehículo será de dos celdas/paso-temporal. Por supuesto, en el caso de no haber espacio para avanzar el coche permanecerá quieto. Hay que destacar que en este modelo tanto la aceleración como la deceleración son instantáneas, del mismo modo que se define en [8], por lo que un vehículo puede pasar en un sólo paso temporal de estar quieto a llevar la velocidad máxima si la situación lo permite, y viceversa. De hecho, implementar aceleración y deceleración graduales no cambia la dinámica global del sistema, que es lo que verdaderamente interesa

²Debido a que se trata de una simulación finita existen fluctuaciones aquí, por lo que aparecen velocidades ligeramente diferentes al valor máximo en lugares en los que es de esperar el valor máximo de la velocidad.

en este trabajo. En resumen, el cambio del modelo DFI-TCA respecto al CA-184 se expresa como sigue ³.

$$v_i(t) \Leftarrow \min(g_{si}(t-1), v_{max}) \quad (3)$$

2.2.1 Tráfico libre con velocidad cuantizada

Con el objetivo de poder comparar resultados con los obtenidos en el apartado anterior, la simulación de tráfico también se ha implementado aquí siguiendo el modelo DFI-TCA en este caso. Además, para poder hacer una comparación coherente se han mantenido las condiciones de la simulación anterior; esto es, se trata de un sistema de un sólo carril dotado de 300 celdas, con una configuración inicial aleatoria. La simulación se lleva a cabo a lo largo de 580 pasos temporales, de modo que cada vehículo puede avanzar 580 veces como máximo, y se mantienen las condiciones de contorno periódicas antes citadas. En cuanto a la velocidad de los automóviles, se impone una velocidad máxima de cuatro celdas por paso-temporal, por lo que depende las circunstancias la velocidad de un coche puede ser de 0, 1, 2, 3 o 4 celdas/paso-temporal. Por tanto, teniendo en cuenta las condiciones de la simulación, los resultados obtenidos se resumen en las figuras 4 y 5.

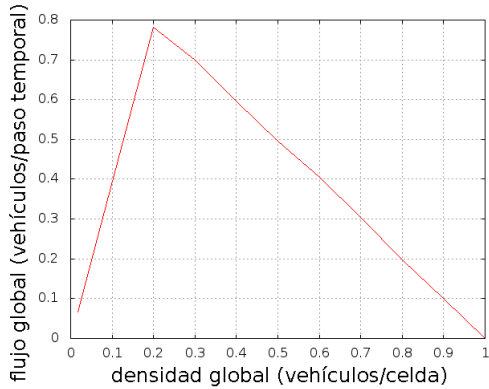


Figura 4: Flujo global vs densidad global en el modelo DFI-TCA.

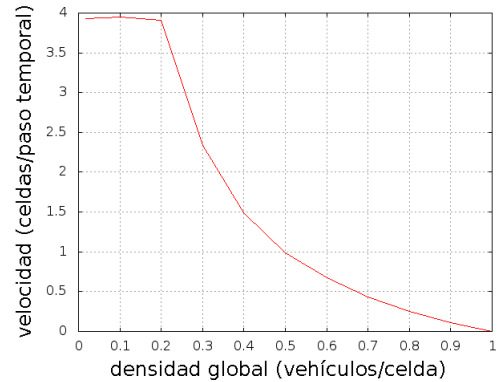


Figura 5: Velocidad media vs densidad global en el modelo DFI-TCA.

La primera conclusión es que la dinámica del sistema no ha cambiado en esta nueva simulación. Esto es, otra vez se obtienen gráficos divididos en dos regiones, separadas éstas por un punto crítico. Hay dos diferencias notables respecto a la simulación del tráfico libre hecha antes. Por una parte, el punto crítico en el cual se da la transición de fase ocurre ahora a una menor densidad. Esta diferencia se debe a que en esta simulación la velocidad

³ $g_{si}(t-1)$ representa el espacio o número de celdas libres existentes en el instante t-1 (paso-temporal anterior a t), es obvio que este parámetro marca el mínimo para la velocidad de los coches cuando la densidad del sistema es grande.

de los coches es generalmente mayor, por lo que éstos avanzan más rápidamente lo que es como si ocuparían más espacio. Por ello, a una densidad relativamente pequeña el sistema se hace pequeño para los vehículos llevando a éstos a formar colas en las que es imposible avanzar a la velocidad máxima, es entonces cuando comienza el embotellamiento y tanto el flujo como la velocidad media del sistema empiezan a disminuir, hasta anularse ambos para la densidad máxima. Analíticamente el valor de la densidad crítica coincide con el valor esperado. En el instante en el que la densidad alcanza su valor crítico todos los coches del sistema viajan a la velocidad máxima, entonces el avance es de $v_{max} + 1$ celdas por cada vehículo e instante, con lo que la densidad crítica del sistema es la siguiente.

$$k_c = \frac{1}{v_{max} + 1} = \frac{1}{4 + 1} = 0,2 \quad (4)$$

Por otra parte, hay que destacar las diferencias de cada gráfico por separado. En cuanto a la representación del flujo respecto a la densidad, decir que el valor del flujo es el mismo que en la simulación anterior para densidad=0.5 (vehículos/celda), que es el valor crítico en el modelo anterior. Ésto es otra prueba de que la dinámica general del sistema ha permanecido invariante en esta simulación. Además, decir que el máximo valor del flujo obtenido coincide con el valor esperado, al igual que con la densidad crítica.

$$q_{cap} = k_c v_{max} \Rightarrow q_{cap} = \frac{v_{max}}{v_{max} + 1} = \frac{4}{4 + 1} = 0,8 \quad (5)$$

Para terminar, en lo que a la representación *Velocidad media-Densidad global* respecta, decir que en la región donde no hay atascos la velocidad media es 4 celdas/paso-temporal; esto es, prácticamente todos los coches del sistema viajan a su velocidad máxima posible. Tal y como ocurría en el modelo CA-184, después de alcanzar la densidad crítica la velocidad media cae abruptamente hasta anularse para la densidad máxima.

3 Desarrollo del trabajo

En esta sección se describe de forma detallada cuál es y cómo se ha llevado a cabo el verdadero objetivo de este trabajo. Partiendo de un problema real se hace uso de la programación “Cellular Automata” para dicho el problema, y también para darle una posible solución. Para ello, se parte del ya presentado modelo DFI-TCA, el cual posteriormente hay que ajustar al problema en cuestión. Los resultados se analizan mediante diagramas de espacio de fase y gráficos como los presentados antes para otras simulaciones. Después

se presentan tres posibles alternativas al problema, estudiando y comparando cada una de ellas.

3.1 Planteamiento del trabajo

El objetivo de este trabajo es estudiar desde el punto de vista científico el flujo del tráfico en la entrada al Campus de Leioa-Erandio de la Universidad Pública del País Vasco (UPV-EHU). El problema de los atascos a primera hora del día es un hecho bien conocido por todos, e incluso los propios dirigentes del campus han llegado a mencionarse sobre ello: *“Al campus de Leioa-Erandio llegamos cada día en torno a 14.000 personas, entre estudiantes, personal de la casa y profesorado. Y buena parte de estas personas acceden a primera hora de la mañana, lo que colapsa la entrada por la calle principal, la Vía Apia”*. Recientemente se ha construido un aparcamiento de vehículos próximo a la entrada del campus, tal y como se muestra en la siguiente figura.



Figura 6: Plano de la entrada al Campus Leioa-Erandio. La línea verde indica la presencia de una paso de cebra, mientras que la línea negra muestra el itinerario que siguen los coches que se dirigen al aparcamiento.

La presencia del aparcamiento es muy importante en el flujo del tráfico, ya que se ha medido que aproximadamente **uno de cada tres** vehículos que entra por la Vía Apia en hora punta (8:10-9:50 am) se dirige posteriormente al aparcamiento, y teniendo en cuenta que todos éstos reducen considerablemente su velocidad para poder realizar la maniobra, es obvio que la presencia del aparcamiento influye de forma negativa en el problema ya existente de la fluidez del tráfico. Respecto a este colapso, las medidas recogen que en el rango horario 8:10-9:50 am entran en el campus aproximadamente 14 coches y 1 autobús por minuto, y cerca de cinco coches de éstos entran en el aparcamiento. Por tanto, pensando en que cerca de 14.000 personas tienen que entrar en la Universidad, la producción de atascos es inevitable en la configuración actual, siendo necesario un estudio profundo del problema. En primer lugar es importante obtener un modelo computacional que represente

en cierta medida la dinámica del sistema real, y una vez hecho ésto, es interesante utilizar este modelo para dar con una solución al problema.

3.2 Primer modelo realista

Con el fin de obtener los primeros resultados, en un primer intento se desarrolla un modelo simple en el cual sólo se tiene en cuenta la presencia del aparcamiento, ignorando la existencia del paso de cebra próximo o vehículos extremadamente lentos (autobuses, maquinaria de obra, etc.). Tal y como se ha comentado antes, la presencia del aparcamiento es muy importante en el flujo de vehículos, ya que todos aquellos que se dirigen al aparcamiento reducen bruscamente su velocidad para acceder a él. Desde el punto de vista de la programación “*Cellular Automata*” ésto se traduce en que existe un determinado tipo de coches que en una cierta región avanza a una velocidad menor que su velocidad habitual. En otras palabras, se define un sistema en el cual los últimos 7 metros corresponden al tramo de carretera donde se sitúa la puerta del aparcamiento; por tanto, en las últimas celdas aquellos coches que van a aparcar avanzan lentamente. Se diseña de esta manera porque a partir de este punto la dinámica vuelve a ser la del tráfico libre y carece de interés; esto es, la física del problema se concentra en la región próxima al aparcamiento, pues es ahí donde nacen los atascos y demás irregularidades del tráfico.

¿Cómo se determina la distancia de frenado o tramo de deceleración? ¿Cuánto disminuye en unidades del modelo CA la velocidad para ir al aparcamiento? ¿Cuánto tiempo debe durar la simulación para representar la realidad? Todas estas cuestiones precisan de una información que todavía no se ha comentado en este trabajo, pero que cobra una gran importancia ahora, se trata de la relación entre las unidades del modelo computacional y el modelo real; esto es, el tiempo real correspondiente a un paso temporal de la simulación y la dimensión en el mundo real correspondiente a una celda (de aquí se determina directamente la velocidad real de los vehículos del modelo). Para tomar estas decisiones es recomendable hacer una serie de medidas experimentales, aunque también se pueden utilizar otros criterios como se ha hecho aquí. Por una parte, en vez de imponer una determinada duración de la simulación, lo que se hace en este trabajo es poner una cantidad inicial de vehículos⁴ en el sistema, de esta manera, a partir de que el coche que inicialmente estaba en la celda o posición más próxima al origen supera la celda en la cual se toman las medidas no hay más medidas posibles, siendo la estadística falsa de este momento en adelante. Por ello, cuando sucede ésto la simulación termina, independientemente de cuántos pasos temporales sean necesarios para ello. Aún y todo, en este preciso modelo se ha impuesto que cada paso-

⁴En este modelo no se imponen condiciones de contorno periódicas como en casos anteriores, sino que cuando un automóvil supera la última celda desaparece para siempre de la simulación. Debido a este cambio es muy importante determinar correctamente el número de coches que hay inicialmente en el sistema.

temporal de la simulación tiene una duración de **dos segundos**. Por otra parte, en lo que a la dimensión de cada celda respecta, se ha tomado que cada celda mide **siete metros**. Hay que decir que este valor es ligeramente menor que el más habitual en estos modelos, que viene a ser en torno a 7.5 metros por celda, se decide así porque esta simulación trabaja con un tráfico relativamente congestionado que tiende a avanzar a velocidades más bien reducidas. En cuanto a los dos segundos por paso-temporal, decir que es mayor que los 1-1.2 segundos que habitualmente se toman en estas simulaciones. Ésto también se debe a que el hecho de existir cierta congestión permanente hace que el avance de los vehículos se ralentice. En definitiva, todos estos parámetros cobran sentido cuando la atención se centra sobre el flujo y la velocidad de los coches, que es lo que verdaderamente marca la dinámica del sistema.

Introducida ya la relación de las magnitudes con el mundo real, es hora de determinar las velocidades posibles de los coches, así como la distancia o número de celdas en las que los coches que van a aparcar avanzan a una menor velocidad. En cuanto a la velocidad, este parámetro se comporta aquí igual que en el modelo DFI-TCA presentado anteriormente, por lo que generalmente los automóviles viajan a la velocidad máxima posible excepto cuando las circunstancias lo impiden. Después de una pequeña observación de los coches en la entrada al Campus Universitario, se ha decidido que la velocidad máxima de los vehículos sea de **tres celdas por paso-temporal**, lo que equivale⁵ a 37.8 km/h. Si sólo hay dos celdas libres hasta el próximo coche la velocidad es de 25.2 km/h, y cuando tan sólo la celda próxima está libre se tienen 12.6 km/h. Por supuesto, si no hay espacio para avanzar el coche permanece quieto en su posición. Por otra parte, es importante hablar de las dimensiones del sistema. La entrada al aparcamiento se sitúa aproximadamente a 110 metros de la entrada del campus; sin embargo, la carretera que conduce al campus desde la salida de la autopista la utilizan casi exclusivamente conductores que se dirigen a la universidad. Por ello, para estudiar el flujo de vehículos es necesario tener en cuenta todo este tramo, de manera que se han realizado simulaciones con 6000 celdas, que equivalen a 42 kilómetros. Quizás sea una distancia exagerada comparado con el tramo real, pero para lograr un tráfico estable se precisa de unas dimensiones como las escogidas. En este caso las dimensiones del sistema son determinantes, ya que no se tienen condiciones de contorno periódicas, sino que los vehículos desaparecen para siempre una vez llegan al final del sistema. Al fin y al cabo, la entrada al aparcamiento se encuentra en la última celda, por lo que la física de este punto en adelante no interesa, simplemente se trata del tráfico libre. Se ha decidido que en las **cuatro últimas celdas (28 metros)** los automóviles que van al aparcamiento avanzan a la mínima velocidad posible, siendo éstos la causa principal

⁵Si cada celda son 7 metros y el paso-temporal es de 2 segundos: $3 \frac{\text{celdas}}{\text{paso-temporal}} = \frac{21}{2} \frac{\text{metros}}{\text{segundos}} = 37,8 \text{ km/h}$.

de los colapsos que se puedan formar. Tal y como se hizo en el modelo DFI-TCA anterior, los vehículos también aceleran y desaceleran de forma instantánea aquí, lo cual no influye ni en el flujo ni en la velocidad globales del sistema.

Una vez explicada la dinámica del programa, es hora de realizar las simulaciones para obtener resultados con los que comparar las medidas experimentales. Para ver en qué medida influye el aparcamiento se han realizado simulaciones para tres ratios diferentes, siendo el ratio la cantidad de coches que van al aparcamiento dividida por la cantidad total de coches. Por tanto, tomando los ratios 0.36 (valor encontrado experimentalmente en las medidas realizadas), 0.1 (considerado el valor mínimo) y 0.5 (considerado el valor máximo), los resultados obtenidos se representan en la figura 7 y en la figura 8.

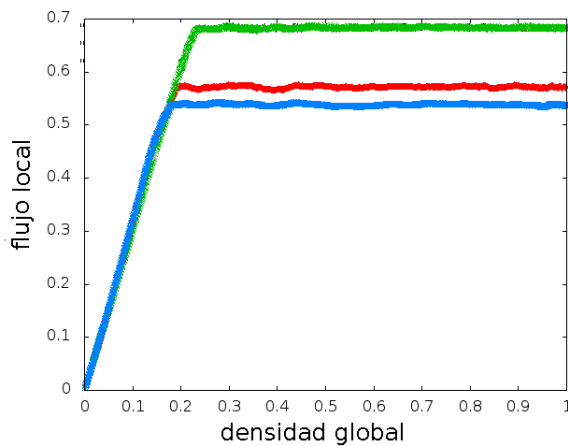


Figura 7: Flujo local vs densidad global. La línea roja corresponde a ratio=0.36, la verde a 0.1 y la azul a 0.5.

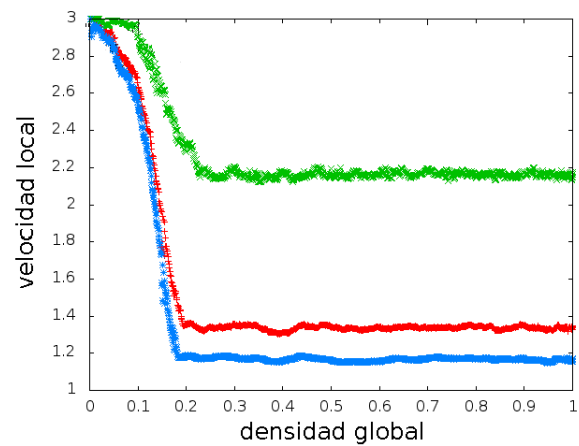


Figura 8: Velocidad local vs densidad global. La línea roja corresponde a ratio=0.36, la verde a 0.1 y la azul a 0.5.

La medición del flujo y la velocidad se ha hecho en las últimas celdas en estas simulaciones, puesto que es aquí donde se encuentra la causa del problema. La primera conclusión que se obtiene de estos resultados es que la presencia del aparcamiento es determinante en la dinámica del tráfico, ya que tanto el flujo máximo como la velocidad máxima se obtienen cuando la cantidad de vehículos que van al aparcamiento es menor, por ejemplo, resulta sorprendente que la velocidad máxima es casi el doble cuando el ratio se disminuye de 0.36 a 0.1. Sin embargo, la relación no es lineal, por lo que la velocidad no disminuye tan abruptamente cuando el ratio se aumenta de 0.36 a 0.5, lo cual se traduce en que existe un valor de saturación. Otro fenómeno que destacar es que hasta llegar a la región de saturación el flujo local aumenta linealmente con la densidad global, algo que también ocurría en las simulaciones del tráfico libre. Aún y todo, la velocidad local disminuye muchísimo a lo largo de esta región, por lo que es la mayor densidad lo que hace que aumente el flujo, contrarrestando la disminución de la velocidad.

El resultado más sorprendente es la presencia de un estado estacionario o de saturación tanto en la gráfica del flujo como en la de la velocidad. Esto es, a partir de una densidad próxima a 0.2 (mayor para un ratio menor) el flujo y la velocidad se hacen constantes para diferentes valores de la densidad global del sistema, lo que se debe a la forma en la que se han realizado las medidas. En vez de utilizar una sola celda, se utiliza un detector de la misma longitud que el máximo avance que puede realizar un coche en un sólo paso, ya que así ningún vehículo escapa del detector. El hecho de utilizar un “detector largo” implica que haya que diferenciar entre la densidad local y la densidad global del sistema. La densidad global es el número de coches del sistema dividido entre el número total de celdas, mientras que la densidad local es la densidad media de vehículos que se tiene en el detector del sistema. Estudiando la relación entre las densidades local y global y la dependencia del flujo local con la densidad local se obtienen los resultados representados en la figura 9 y en la figura 10.

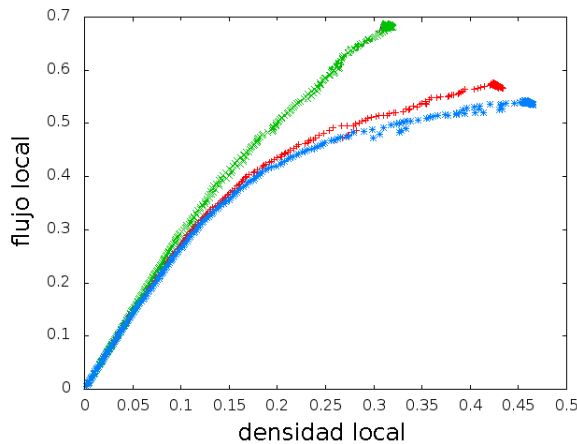


Figura 9: Flujo local vs densidad local. La línea roja corresponde a ratio=0.36, la verde a 0.1 y la azul a 0.5.

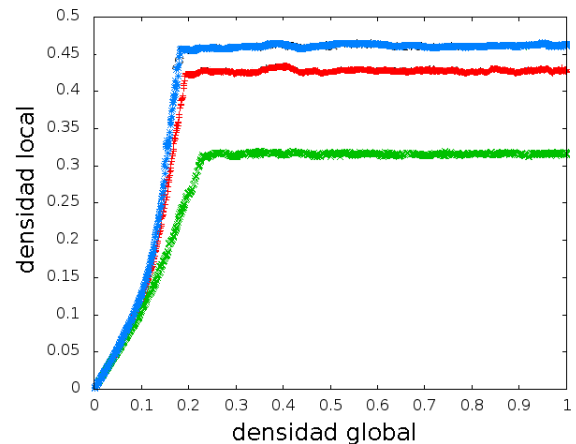


Figura 10: Densidad local vs densidad global. La línea roja corresponde a ratio=0.36, la verde a 0.1 y la azul a 0.5.

Tal y como muestran las figuras, la densidad local tiene en todos casos un valor máximo lejano a la unidad. La razón de ésto es simplemente la regla 184 utilizada para implementar la evolución paralela de todos los vehículos del sistema. Así como se explicó en la sección *Modelos Cellular Automata*, un vehículo no puede avanzar si la celda posterior no se encuentra libre; por tanto, un conjunto denso de varios autos no avanza uniformemente como un bloque, siendo inevitable que en la evolución del sistema aparezcan huecos. De hecho, incluso cuando la densidad global es muy alta (cercana a uno) la densidad local no alcanza valores mayores de 0.5, por lo que la alta densidad inicial se ve rápidamente destruida conforme los coches avanzan en el sistema. En definitiva, la naturaleza del sistema hace que la densidad local no logre valores altos, entrando así en lo que se denomina “régimen

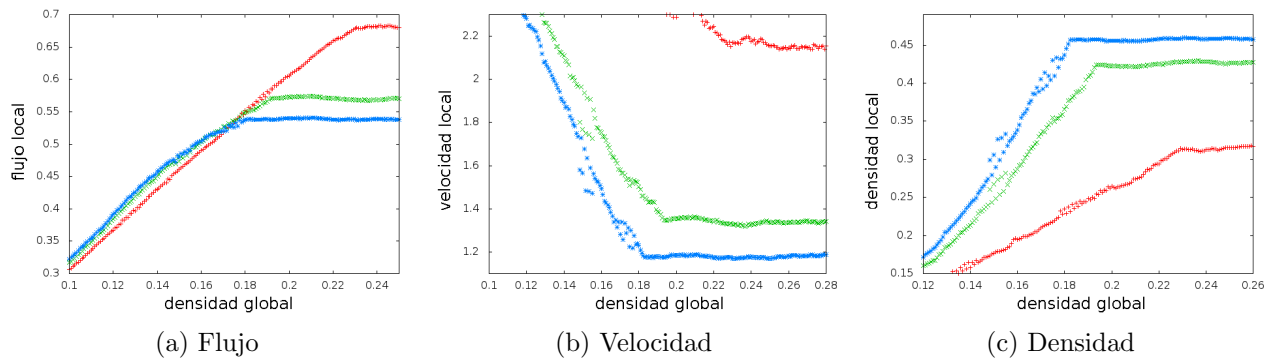


Figura 11: Flujo, velocidad y densidad local frente la densidad global.

de saturación”.

El régimen de saturación se identifica con facilidad en las anteriores gráficas. Por una parte, en la figura 9, el flujo aumenta a medida que la densidad local también lo hace; sin embargo, llegado al régimen de saturación (diferente para cada ratio) la densidad local alcanza su valor máximo y a partir de entonces el flujo queda estacionario. Por otra parte, tanto en la figura 10 como en las representaciones del flujo y la velocidad frente a la velocidad local la función es prácticamente constante una vez entra en el régimen de saturación, lo cual es de esperar una vez comprendido qué es el régimen de saturación.

Dejando a un lado la idea de saturación, la cual se retomará más tarde, es el momento de estudiar otro resultado importante obtenido en las gráficas anteriores. A pesar de que tanto el flujo como la velocidad de saturación son dependientes de la cantidad de coches que se dirigen al aparcamiento, los resultados muestran que el valor de la densidad global para el cual el sistema se satura es similar en los tres casos estudiados. Para ver este fenómeno en detalle es conveniente hacer un *zoom* en la región que interesa de algunas gráficas, tal y como muestran las figuras 11a, 11b y 11c.

Teniendo en cuenta que las simulaciones se han realizado en un sistema de 6000 celdas, el número inicial de coches a partir del cual el sistema se satura es de 1380, 1170 y 1110 para los ratios⁶ 0.1, 0.36 y 0.5 respectivamente. Por tanto, dado que se trata de un sistema de grandes dimensiones las diferencias son más que notables, de hecho, la diferencia es del 20 % entre el máximo y el mínimo ratio y del 5 % entre los mayores ratios. En conclusión, la presencia del aparcamiento en la entrada al *Campus Leioa-Erandio* no sólo disminuye la velocidad y el flujo de los vehículos, sino que además hace que la capacidad de la vía sea menor, por lo que el colapso de la carretera se da con una menor densidad de vehículos en la entrada del campus.

Resumiendo brevemente el trabajo realizado hasta el momento, se ha implementado

⁶Recordar que el ratio es el número de coches que van al aparcamiento dividido entre el número total de vehículos.

una simulación *CA* donde los vehículos pueden tener cuatro velocidades posibles, excepto si se trata de los coches que van al aparcamiento y éstos se encuentran en las últimas celdas o metros del sistema. Debido a la proximidad del aparcamiento los automóviles avanzan a la mínima velocidad posible (12.6 km/h) aquí. En lo que a los resultados se refiere, cabe destacar la dependencia del flujo y la velocidad de los coches con la cantidad de éstos que se dirigen al aparcamiento. A pesar de que el fenómeno no es importante a densidades bajas, a densidades altas una mayor presencia de coches que van al aparcamiento hace que la carretera colapse antes, y además que el flujo de vehículos en este estado colapsado sea todavía menor, la velocidad media al fin y al cabo.

El estudio hecho hasta ahora deja en evidencia que los parámetros que marcan la dinámica de la carretera son fuertemente dependientes del recién inaugurado aparcamiento. De hecho, las simulaciones realizadas muestran unos resultados que cumplen las predicciones, fortaleciendo así la idea de que el aparcamiento es una de las principales causas de los colapsos en la carretera a primera hora de la mañana. Aún y todo, no es fácil ver cuál es la dinámica del sistema en las gráficas mostradas hojas atrás, ya que no se muestra explícitamente cómo se forman y se extienden los atascos en la vía. Por ello, es conveniente realizar unas gráficas que muestren de manera transparente cómo evoluciona el sistema, representando la carretera con sus correspondientes vehículos.

En las siguientes gráficas se han realizado estas representaciones. De abajo a arriba evoluciona el tiempo (se han representado los primeros 67 minutos aproximadamente), mientras que de izquierda a derecha se extienden las 200 últimas celdas del sistema (1.400 metros), encontrándose justo al final el aparcamiento. Cada punto negro indica la presencia de un vehículo, vaya o no al aparcamiento, o simplemente que dicha celda se encuentra ocupada, mientras que se representa en blanco si está vacía. En definitiva, en cada línea se representa la configuración de las 200 últimas celdas del sistema en un determinado instante, mostrándose la evolución temporal de éstas en dirección vertical. Se han realizado cinco representaciones, para diferentes ratios o densidad de coches que van al aparcamiento y para diferentes cantidades iniciales de vehículos. Los valores se muestran en el pie de cada gráfica en cada caso; por ejemplo, en la figura 12a la simulación se ha iniciado con 1100 vehículos y el ratio es de 0.5; esto es, la mitad de los coches van al aparcamiento. La notación se repite en las figuras 12b, 12c, 12d y 12e.

Se distinguen claramente dos regiones en todas las gráficas. Por una parte, cuando la carretera no se encuentra colapsada, sino que se tiene un tráfico fluido y relativamente libre, la evolución temporal de los vehículos en el sistema da lugar a unas curvas monótonamente crecientes en las representaciones. Al fin y al cabo, esto es consecuencia de que los vehículos avanzan muy rápido en esta región. Por otra parte, cuando se forman atascos y los coches avanzan a la mínima velocidad posible se forman lo que se conoce como funciones

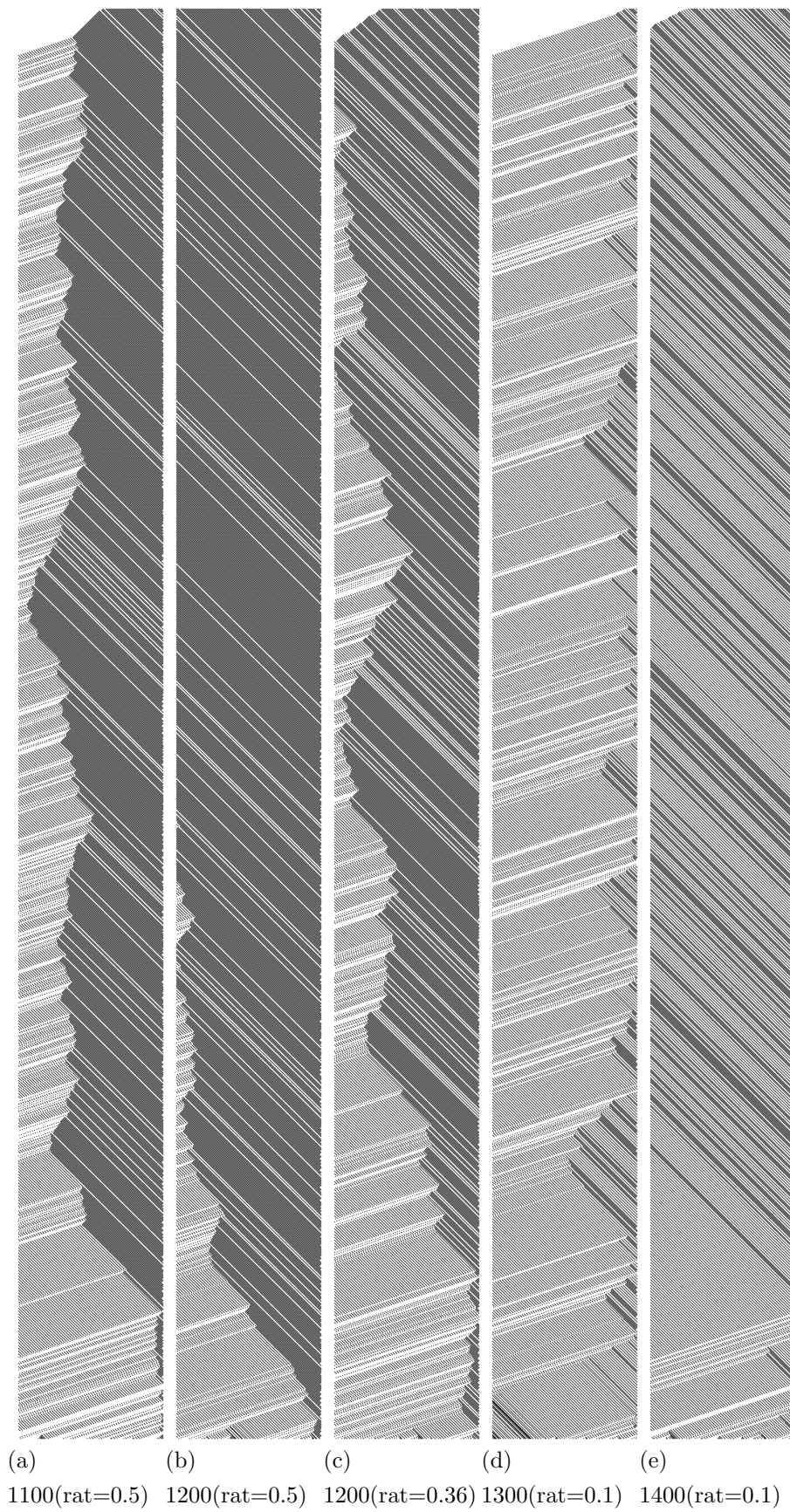


Figura 12: Evolución temporal de las últimas 200 celdas en los primeros 2000 pasos temporales.

monótonamente decrecientes. En cierto modo, se puede decir que son los huecos los que avanzan hacia atrás de la carretera debido al colapso que se forma al final de ésta y que se extiende cada vez más. Cabe destacar que la pendiente es mucho más pronunciada en esta región que en la región correspondiente al tráfico libre, por lo que los atascos se propagan en la vía más rápido que el tiempo necesario para que el tráfico avance de forma fluida. Además, decir que el valor de las dos pendientes comentadas es el mismo en las cinco simulaciones, de modo que se trata de una característica propia del sistema. Finalmente, es interesante ver que en todas las gráficas excepto en la segunda los coches empiezan a desaparecer del sistema en los últimos instantes representados. Ésto ocurre debido a que ciertamente el sistema se empieza a quedar vacío de coches, y no sólo eso, sino que deja en evidencia que son los colapsos con origen en el aparcamiento los responsables de la ralentización del tráfico, ya que la fluidez es buena en la región anterior, que rápidamente se queda vacía.

En cuanto a la comparación de las gráficas se refiere, es interesante discutir el punto crítico en las diferentes gráficas; esto es, ver la transición de fase y la manera en la que se entra en la región de saturación en cada uno de los casos. En primer lugar, en el caso de que la mitad de los coches vaya al aparcamiento, $\text{ratio}=0.5$, la figura 12a muestra que si la simulación se inicia con 1100 vehículos los colapsos no tardan en aparecer en las últimas celdas; sin embargo, estos atascos no se extienden mucho más allá y, con sus debidas fluctuaciones, se mantiene cierta estabilidad en el flujo de vehículos. Por tanto, debido a la existencia de pequeños colapsos, el tráfico no se encuentra en el régimen de saturación aquí, pero sí cerca del punto crítico. Es más, si para este mismo ratio la simulación se inicia con 2000 coches, tal y como se ha hecho en la figura 12b, el colapso del tráfico aparece inmediatamente y además se extiende rápidamente hacia atrás de la vía. El tráfico se encuentra totalmente saturado, lo cual es coherente con el resultado obtenido antes, que predecía que para un ratio de 0.5 el punto crítico se encuentra para 1110 vehículos iniciales. Resulta ilustrativo ver que manteniendo la condición de 1200 coches iniciales pero disminuyendo el ratio de 0.5 a 0.36 el sistema permanece en el régimen de saturación, pero muy cerca del punto crítico que se encontró antes en 1170 coches iniciales. Tal y como se ve en la figura 12c, el colapso no se extiende con claridad en el sistema, aunque se ve que a partir del transcurso de la primera hora las últimas 200 celdas (1.4 kms) están por lo menos colapsadas. Para terminar, reafirmando la importancia que tiene la cantidad de automóviles que van al aparcamiento, la figura 12d muestra que si el ratio es de 0.1 el tráfico aún es fluido con 1300 coches, con la debida ralentización en la puerta del edificio. Eso sí, el punto crítico se encuentra en 1380 autos, y por ello se ve que el tráfico se colapsa rápidamente en la figura 12e.

Todas las simulaciones hechas hasta ahora se han centrado exclusivamente en las últimas

celdas del sistema, realizando en este punto todas las medidas necesarias. Tal y como se explicaba en el inicio de esta sección, es aquí, justo en las inmediaciones del aparcamiento, donde se encuentra la verdadera causa del problema; sin embargo, no está de más ver qué ocurre en regiones más alejadas; por ejemplo, para ver si los atascos con origen en el final del sistema se extienden formando largas colas, o no. Con este objetivo se han realizado dos simulaciones, cuyos resultados se muestran en la figura 13. Ambas se han hecho con un mismo ratio de 0.36^7 , pero el detector se ha colocado en diferentes posiciones en las simulaciones, justamente en las celdas 4000 (línea roja) y 5700 (línea verde).

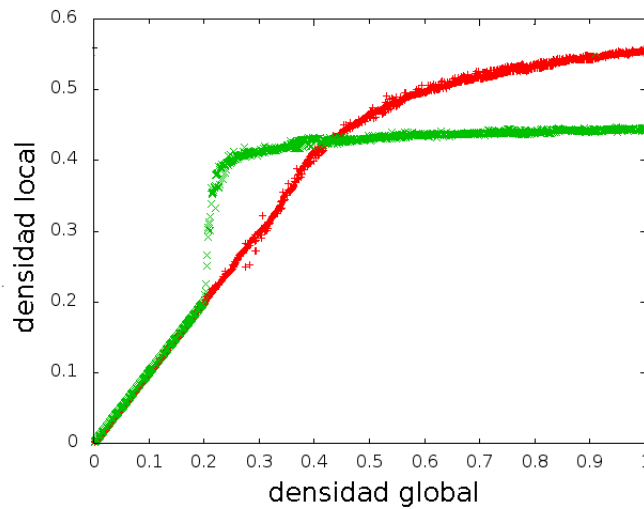


Figura 13: Densidad local en función de la densidad global. La línea roja corresponde a los datos tomados en la celda 4000, mientras que la línea verde muestra los datos obtenidos en la celda 5700.

El resultado obtenido es tan sorprendente como significativo. En primer lugar, cabe destacar que cuando la densidad global es pequeña aparece una región lineal en ambas simulaciones, tal y como ocurría en las simulaciones anteriores. Pero en este caso la región lineal es mucho más extensa, cuatro veces mayor en los datos tomados en la celda 5700 y aproximadamente ocho veces mayor cuando el detector se encuentra en la celda 4000. En lo que a la región de saturación se refiere, las diferencias son más que notables en las dos simulaciones. Por una parte, cuando los datos se han tomado a 300 celdas del final, en la celda 5700, se ve claramente que cuando finaliza la región lineal ocurre la transición de fase y el sistema se satura casi instantáneamente, de manera similar a como ocurría en las gráficas mostradas antes. Por tanto, cuando el sistema se satura los atascos forman fácil y rápidamente colas de aproximadamente dos kilómetros. Por otra parte, el resultado es bien distinto en la otra simulación. La línea roja muestra perfectamente cómo la densidad

⁷Recordar que éste es el ratio que se obtuvo experimentalmente.

local tiende asintóticamente a una constante, pero de una manera muy suave una vez superada la región lineal, no como en todas simulaciones vistas hasta ahora, donde la región de saturación implicaba el colapso inmediato. Así, los atascos no llegan a extenderse completamente hasta este punto, a 14 kms del aparcamiento, pero sí que llegan a influir negativamente en el flujo de vehículos, y en el tráfico en general.

3.3 Segundo modelo: Paso de cebra

En la sección anterior ha quedado claro que un modelo computacional simple que contenga la característica más importante del sistema físico como es el aparcamiento en este caso, es suficiente para simular y por tanto estudiar la dinámica general del tráfico. Aún y todo, es obvio que existen diversos factores que no se han tenido en cuenta en el modelo anterior, y que, quién sabe, quizás también sean relevantes en el comportamiento del tráfico. El primer paso hacia esta especialización se da en este modelo mediante la introducción del paso de cebra que se mostró con claridad en la figura 6, en la página 11.

La implementación computacional del paso de cebra es relativamente simple, ya que tres parámetros son suficientes para llevarla a cabo. En primer lugar, hay que tener en cuenta que el paso de cebra se encuentra aproximadamente a 10 metros de la entrada al aparcamiento; por tanto, cada vez que un peatón pasa por él, el vehículo que se encuentre a 14 metros de la entrada se ve obligado a detenerse. Sabiendo que cada celda del modelo mide 7 metros y que el sistema tiene un total de 6000 celdas, se ha decidido que cuando el paso de cebra esté ocupado el automóvil que esté en la celda 5998, justo a 14 metros del final, tenga que detenerse. Por otra parte, es importante determinar durante cuánto tiempo tiene que estar detenido dicho coche. Dado que se trata de un paso de cebra corto, aproximadamente 4-5 metros de anchura, 4 segundos son suficientes para cualquier peatón, por ello cuando se activa el paso de cebra el vehículo situado en la celda 5998 tiene que detenerse durante dos⁸ pasos temporales o *time step*. Por último, el parámetro más importante es sin duda la frecuencia con la que se activa el paso de cebra. Esta simulación se centra principalmente en el rango horario 8:10-9:50 am; por tanto, es lógico estimar que cada minuto el paso de cebra se utiliza una vez, de manera que la probabilidad es de $\frac{1}{60\text{seg}} = \frac{1}{30\text{time-step}} \simeq 0,03$; esto es, del 3 %.

Tomando todas estas consideraciones se ha realizado la simulación, en la cual se han realizado las medidas en la celda 5995, ya que es aquí donde más se debería notar la presencia del paso de cebra. El ratio o densidad de autos que van al aparcamiento ha sido del 36 %. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 14 y en la figura 15.

La conclusión es que la influencia del paso de cebra en el tráfico es muy pequeña, y

⁸Cabe destacar que hay veces en las que un peatón empieza a cruzar cuando el coche más cercano está todavía a cierta distancia, de modo que dicho coche sólo se detiene la mitad de tiempo en este caso.

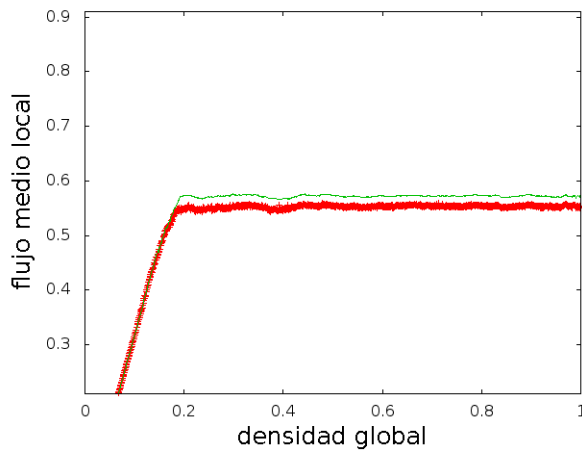


Figura 14: Flujo local vs densidad global. La línea roja corresponde a la simulación que tiene en cuenta el paso de cebra, la verde no.

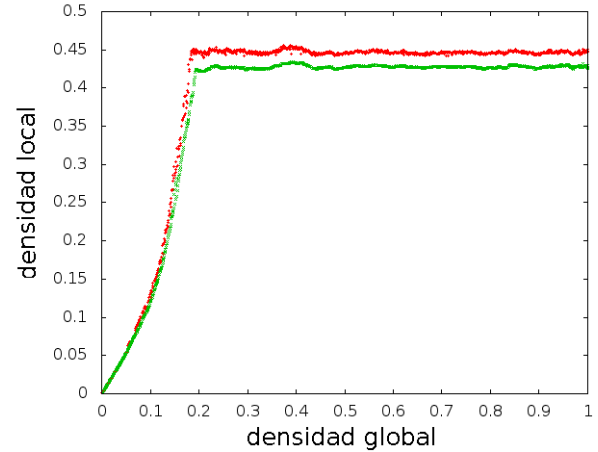


Figura 15: Densidad local vs densidad global. La línea roja corresponde tiene en cuenta el paso de cebra, la verde no.

por tanto no es la causa ni de los atascos que se forman en la vía, ni de la ralentización del tráfico en la entrada al campus. Cabe destacar que la influencia del paso de cebra es menor a medida que uno se aleja de él, y a pesar de aquí no se presentan explícitamente los resultados, se ha visto que ya en la celda 5700 la presencia del paso de cebra es despreciable, y totalmente indistinguible en la celda 4000, a 2000 celdas del paso de cebra.

3.4 Tercer modelo: Autobuses

Todos los usuarios del Campus Leioa-Erandio conocen bien los autobuses que unen la universidad con diversas localidades de Euskal Herria; su tamaño, su alta presencia en hora punta (8:10-9:50) o su capacidad para ralentizar el tráfico. Con el objetivo de ver en qué medida influye la presencia de los autobuses en el tráfico, en esta sección se implementa un modelo, partiendo de todos los avances hechos hasta ahora, en el cual se tiene en cuenta la presencia de autobuses en la carretera.

Tal y como se hizo en el apartado anterior, hay ciertos parámetros que hay que tener en cuenta para implementar la presencia de autobuses en el modelo computacional, como son la envergadura de los buses, la velocidad, y la cantidad que se tiene de éstos. En lo que a envergadura y velocidad se refiere, no se han realizado medidas experimentales, de modo que es necesario hacer una estimación aquí. Por una parte, la mayoría de los buses que a primera hora de la mañana transitan por el campus son autobuses dobles, más conocidos como “autobuses articulados”. Estos vehículos superan los 20 metros de longitud y además hay que tener en cuenta la distancia de seguridad que dejan los vehículos de alrededor. Aún y todo, teniendo en cuenta que no todos buses son tan largos, se ha determinado que cada

bus ocupa una media de tres celdas, que equivale a 21 metros. Por otra parte, es obvio que estos vehículos no son tan ágiles y veloces como los coches, por lo que su velocidad máxima se ha fijado en $2 \frac{\text{celdas}}{\text{paso-temporal}}$, que equivale a 25.2 km/h.

En cuanto a la cantidad de autobuses, las medidas hechas durante las horas 8:10-9:50 arrojan que aproximadamente un 7% de los vehículos que entran al campus a esta hora son autobuses. Y aunque este valor depende de otros factores como las condiciones metereológicas, este valor medio es el que se ha tomado como referencia para determinar cuántos buses hay en cada simulación. Bajo todas estas condiciones se ha realizado la simulación con autobuses y los resultados han sido cuanto menos sorprendentes. Para empezar, realizando las medidas en las últimas celdas y fijando que un tercio de los coches van al aparcamiento, como es habitual, la densidad local y el flujo en función de la densidad local obtenidos se representan en la figura 16 y la figura 17 respectivamente.

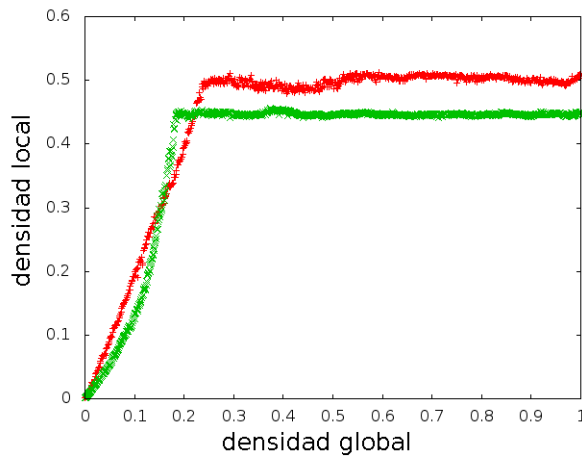


Figura 16: Densidad local vs densidad global. La línea roja corresponde a la simulación que tiene en cuenta los buses, la verde no.

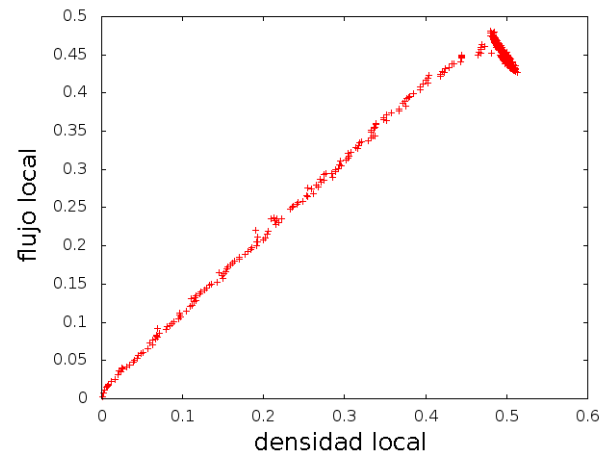


Figura 17: Densidad local vs densidad global.

En cuanto a la figura 16, hay que destacar dos cosas. Por una parte, la máxima densidad local⁹ es ahora mayor, algo que no es de extrañar, puesto que la existencia de autobuses que ocupan tres celdas de manera compacta aumenta considerablemente el valor de este parámetro. Por otra parte, resulta interesante ver que en la carretera con autobuses el régimen de saturación se encuentra a una densidad global mayor que en los anteriores modelos. Al fin y al cabo, la presencia de autobuses implica cierto orden en el tráfico, y a pesar de que el flujo se vea ralentizado, la dinámica general del tráfico se vuelve más uniforme. Por ello, los huecos tardan más en aparecer y el sistema no entra en el régimen

⁹Densidad local es como se denomina a la densidad de vehículos existente en el detector o realizador de medidas.

de saturación hasta una densidad global que supera en cerca de la quinta parte a la que se encontraba en ausencia de buses. El resultado que muestra la figura 17 es totalmente acorde a este hecho, ya que en vez de aumentar abruptamente con la densidad global para saturar rápidamente como ocurría anteriormente, el flujo aumenta ahora de forma lineal hasta alcanzar su valor máximo, lo cual se relaciona con el orden que existe ahora en la vía.

Puede parecer que la mayor densidad local que se ha logrado es sinónimo de mejora en la circulación del tráfico; sin embargo, basta con estudiar el flujo y la velocidad media del sistema, tal y como se representa en las figuras 18 y 19 respectivamente, para ver que no es así.

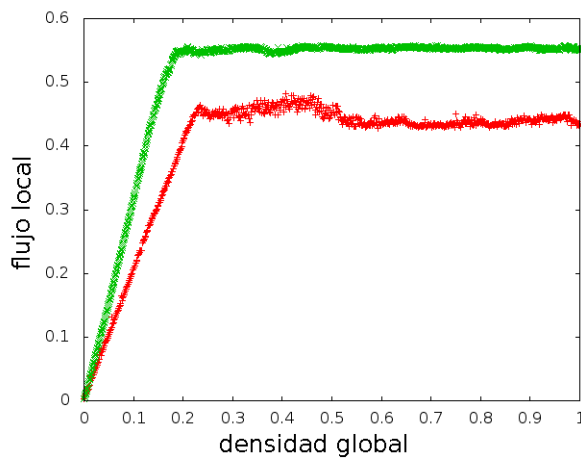


Figura 18: Flujo vs densidad global. La línea roja corresponde a la simulación que tiene en cuenta los buses, la verde no.

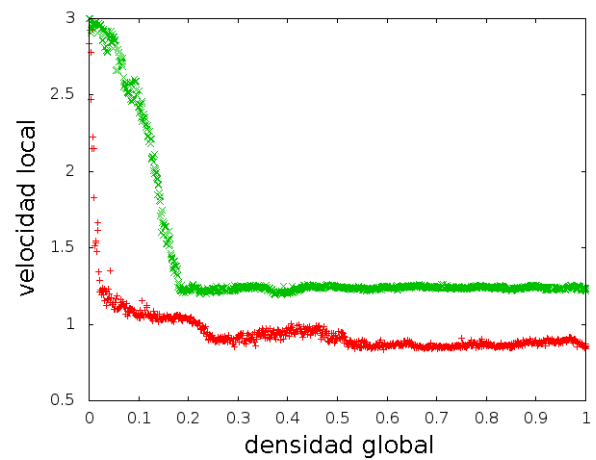


Figura 19: Velocidad vs densidad global. La línea roja corresponde a la simulación que tiene en cuenta los buses, la verde no.

La representación del flujo no deja lugar a dudas de que el tráfico se ve ralentizado a causa de los autobuses. Al fin y al cabo, la disminución en la velocidad media es mucho mayor en magnitud que el aumento de la densidad local, por lo que el flujo de vehículos se ve ralentizado aproximadamente en un 18 %. Aún y todo, hay que tener en cuenta que cada bus transporta fácilmente 50 veces más pasajeros que un automóvil, por lo que su influencia negativa en el tráfico no implica que se deba prescindir de ellos, sino más bien aumentar su uso en medida de lo posible. Cabe destacar que la velocidad es prácticamente constante y muy baja para todas las densidades, de modo que apenas se distingue la transición al estado de saturación. En conclusión, la presencia de buses en la vía aumenta considerablemente la densidad de vehículos, pero disminuye considerablemente la velocidad de los coches y el flujo del tráfico en general.

Para terminar, hay que decir que también se han realizado simulaciones con autobuses

para diferentes cantidades de coches que van al aparcamiento, y a diferencia de lo que ocurría en anteriores modelos, el flujo y la velocidad no dependen fuertemente de este parámetro. Esto es, con autobuses en la carretera el hecho de que los coches que entran al aparcamiento tengan que frenar para hacerlo no tiene una influencia demasiado negativa.

3.5 Alternativas

Desde los primeros resultados expuestos en este trabajo ha quedado claro que la presencia del aparcamiento en la entrada al Campus Leioa-Erandio de la Universidad Pública del País Vasco (UPV-EHU) es una de las principales causas del colapso del tráfico, sobre todo a primera hora de la mañana. Visto y estudiado el problema, es hora de analizar las distintas alternativas que se presentan para encontrar una solución al problema.

3.5.1 Alternativa A

La primera opción que se presenta es dejar todo tal y como está, con la configuración que se muestra en la figura 20.



Figura 20: Esquema de la situación actual de la entrada al campus y de los accesos al aparcamiento.

Este es el caso que se ha estudiado hasta ahora, y del que se ha discutido larga y tendidamente a lo largo del trabajo. Utilizando el dato de que un 36 % de los coches se dirige habitualmente al aparcamiento se han logrado los siguientes resultados:

- Velocidad: $1.25 \frac{\text{celda}}{\text{paso-temporal}} = 15.75 \text{ km/h}$
- Flujo: $0.55 \frac{\text{coche}}{\text{paso-temporal}} = 16.5 \text{ coches/min}$

- Densidad: $0.45 \frac{\text{coche}}{\text{celda}} = 0.0643 \text{ coche/m}$

Es obvio que esta configuración no cumple con las necesidades del campus, y así lo demuestran los atascos matutinos o el hecho de que hagan falta más de dos horas (según este flujo) para que cerca de 14.000 usuarios de la universidad puedan acceder a ella. Por otra parte, decir que se trata de un resultado muy próximo a la realidad, puesto que según las medidas experimentales el flujo de vehículos a la entrada del campus es de **14.12 coches/min**, un resultado similar al obtenido en la simulación. Por tanto, el modelo diseñado cumple satisfactoriamente con su objetivo, que es el de simular el tráfico en las proximidades del aparcamiento con el fin de analizar los efectos de éste; sin embargo, se trata de un modelo limitado, y por ello no es apto para estudiar el tráfico en regiones lejanas al campus como puede ser la carretera que une la universidad con la autopista.

3.5.2 Alternativa B

La primera alternativa real a la configuración actual del tráfico consiste simplemente en invertir las actuales puertas de entrada y salida; esto es, convertir lo que actualmente es la entrada al aparcamiento en la salida, y viceversa. De esta manera, tal y como se ilustra en la figura 21, todos los vehículos tienen que realizar el tramo *A*; sin embargo, la presencia de dos carriles en el tramo *B* hace que los coches que van al aparcamiento se separen de los demás, circulando tan sólo ellos por el carril de la derecha. Finalmente, el tramo *C* sólo lo realizan aquellos coches que van al aparcamiento.



Figura 21: Esquema de la primera alternativa a la configuración actual.

Con esta configuración los coches que van al aparcamiento y los que no se encuentran desacoplados a partir del tramo *A*; esto es, se vuelven totalmente independientes. Además, dado que cuando los vehículos abandonan el aparcamiento no existe ningún problema en

la fluidez del tráfico, la salida del edificio en la posición de la entrada actual no genera problema alguno.

En lo que a lo exclusivamente computacional se refiere, la implementación de este cambio pasa simplemente por una pequeña modificación del programa. Se han mantenido las 6000 celdas del programa anterior, ya que los nuevos tramos B y C apenas suman 175 metros (25 celdas) despreciables en comparación con las dimensiones totales del sistema en cuestión. Así, todos aquellos vehículos que no van al aparcamiento desaparecen de la carretera a partir de la celda $6000-25=5975$; esto es, justo al comienzo del tramo B . Hay que tener en cuenta que ahora las medidas no se realizan al final del sistema, ya que éstas no serían buenas para comparar con las otras debido a la ausencia de más de la mitad de los coches. Por ello, las medidas se hacen en el punto donde coinciden los tramos A y B , que es donde ocurre la bifurcación de los carriles y de los coches. De esta manera los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación.

- Velocidad: $2.98 \frac{\text{celda}}{\text{paso-temporal}} = 37.5 \text{ km/h}$
- Flujo: $0.73 \frac{\text{coche}}{\text{paso-temporal}} = 21.9 \text{ coches/min}$
- Densidad: $0.25 \frac{\text{coche}}{\text{celda}} = 0.0357 \text{ coche/m}$

En primer lugar, mencionar que el flujo de vehículos ha mejorado considerablemente con los cambios implementados, cerca de un 25 %. Este resultado está íntimamente ligado con el aumento de la velocidad media de los coches, así como con la disminución de la densidad de coches en la carretera, que muestra un sistema mucho menos colapsado y casi sin la presencia de atascos. Por otra parte, quizás cabía esperar que a altas densidades de coches en la vía los atascos con origen en la entrada del aparcamiento; esto es, al final del tramo C , generarían largas colas hasta llegar al tramo A y colapsar el sistema por completo. Sin embargo, la simulación realizada muestra que estas colas no van más allá de los tramos $B+C$, y tan sólo cuando la densidad global es casi máxima se ve una ligera disminución en el flujo y la velocidad debido a este fenómeno, que resulta prácticamente insignificante. Por tanto, si la cantidad de coches que van al aparcamiento es del 36 %, la cual fue obtenida experimentalmente y se ha tenido en cuenta también en esta simulación, esta configuración es una alternativa barata y eficiente al problema del tráfico.

3.5.3 Alternativa C

Otra alternativa que también se debe considerar, a pesar de que resulte económicamente más costoso llevarla a cabo, es la que se presenta en la figura 22.

En este caso, además de invertir la entrada y la salida del aparcamiento de la misma manera que se hizo en la solución anterior, se aprovecha la nueva vía (tramo D , utilizado



Figura 22: Esquema de la segunda alternativa a la configuración actual.

actualmente para salir del aparcamiento y del campus) tan sólo para entrar al aparcamiento. Si sólo los coches que van al aparcamiento utilizan esta vía, los distintos vehículos no coinciden en ningún tramo y ahora sí que se encuentran totalmente desacoplados. De hecho, el tráfico queda dividido en dos partes, sin que exista ningún tipo de interacción entre éstas.

La implementación computacional de este modelo no precisa de un nuevo programa, ya que los coches que van al aparcamiento y los que no van no coinciden en ningún tramo. Por tanto, se trata simplemente de tomar el programa del apartado “Solución A” y realizar la simulación imponiendo que ningún coche vaya al aparcamiento. Al fin y al cabo, se trata de simular el tráfico libre, del mismo modo que se hizo en la sección 2.2.1 de este mismo trabajo, a excepción de las condiciones de contorno, que en este caso no son periódicas. En definitiva, los resultados obtenidos en este caso han sido los siguientes.

- Velocidad: $2.74 \frac{\text{celda}}{\text{paso-temporal}} = 34.52 \text{ km/h}$
- Flujo: $0.73 \frac{\text{coche}}{\text{paso-temporal}} = 21.9 \text{ coches/min}$
- Densidad: $0.27 \frac{\text{coche}}{\text{celda}} = 0.0386 \text{ coche/m}$

“¡Caramba!” (Te he escuchado exclamar.) “¡El flujo es igual que el anterior!” Efectivamente, el flujo es el mismo en las dos alternativas propuestas. A pesar de que la densidad de vehículos es mayor en este modelo, la velocidad de circulación de los coches es ligeramente menor que en el modelo presentado como “Solución B”, de manera que el flujo es el mismo en ambos modelos, y en definitiva, la capacidad del campus para recibir vehículos.

En conclusión, tanto esta propuesta como la presentada en la sección anterior resultan ser muy eficientes, ya que ambas muestran una mejora en el flujo del 25%. Por tanto,

además de agilizar el tráfico y evitar en cierta medida los atascos a primera hora de la mañana, estos cambios harían del recién construido aparcamiento una herramienta útil y no un estorbo para estudiantes, trabajadores y demás usuarios del campus. Aún y todo, en cuanto a los modelos computacionales utilizados en esta sección, cabe destacar que sí se ha tenido en cuenta la presencia del paso de cebra, pero no la de los autobuses. Por ello, antes de sacar una conclusión definitiva de todo ésto, conviene ver qué ocurre con estas alternativas si se tienen en cuenta los autobuses, lo cual se hace en el siguiente apartado.

4 Conclusiones

Llegados a este punto del trabajo, uno se pregunta qué se puede concluir del estudio realizado; esto es, si el modelo computacional utilizado para estudiar el tráfico es fiable, si el aparcamiento es verdaderamente importante en el flujo de vehículos, o, en caso de existir y enfocar el problema del tráfico, si existe una solución realista y eficaz al mismo tiempo.

La primera conclusión que se obtiene del estudio realizado es la confirmación de que, efectivamente, existe un problema con el tráfico en la entrada al Campus de Leioa-Erandio de la Universidad Pública del País Vasco (UPV-EHU) en el rango horario 8:10-9:50. Tal y como muestran las primeras simulaciones hechas en este trabajo, cuando aproximadamente un tercio de los coches van al aparcamiento el flujo máximo apenas alcanza los 16.5 coches/min y se obtiene una velocidad de 15.75 km/h que resulta insuficiente para evitar el colapso del tráfico. Es más, no hace falta hechar mano de las simulaciones para darse cuenta de la existencia del problema, ya que los propios datos experimentales arrojan un flujo 14 coches y un autobús por minuto, y teniendo en cuenta que cerca de 14.000 personas tienen que entran a la universidad, y considerando una media de 1.5 personas por coche y 80 personas por autobús, se necesitan unas **2 horas y 20 minutos** para que estas personas accedan a sus puestos de trabajo. Es importante destacar la validez del modelo computacional utilizado, puesto que los datos obtenidos de la simulación apenas difieren en un 15 % de los datos experimentales. Por tanto, se puede afirmar que tanto el modelo DFI-TCA escogido como los parámetros determinados (tamaño real de una celda...) han sido los adecuados para estudiar el tráfico en las condiciones deseadas.

Por otra parte, es necesario destacar una vez más la influencia del aparcamiento en la dinámica del tráfico. Antes de comenzar con este trabajo uno de los objetivos principales era el de estudiar si la presencia de dicho aparcamiento tenía verdaderamente repercusión en el flujo de vehículos, y después de este profundo estudio, se puede afirmar que así es. Por sorprendente que parezca, el flujo de coches es fuertemente dependiente de la cantidad de vehículos que van al aparcamiento, de hecho, cuando esta cantidad aumenta de un 10 % a un 50 % el flujo disminuye en un 20 %, lo que señala al aparcamiento como una de las

principales causas de los atascos. Las gráficas mostradas en la página 18 son otra afirmación de este argumento. Tal y como se explicó en su correspondiente sección, el punto crítico que marca la transición del estado en el que el tráfico se encuentra fluido al estado colapsado corresponde a una densidad mayor cuando la cantidad de coches que van aparcamiento es menor, y viceversa. En conclusión, la menor velocidad de estos automóviles ralentiza el tráfico drásticamente, tanto en comparación con la influencia negativa del paso de cebrera como con la presencia de autobuses en la vía, por tanto, es el tema en el que hay que centrarse para dar con la solución del problema.

Sin duda alguna la conclusión más importante es la que da con la solución del problema. En el último apartado del trabajo se mostraron dos posibles alternativas a la configuración actual del tráfico en la universidad, obteniéndose en ambos casos el mismo valor del flujo de vehículos, que viene a ser la magnitud que dicta la dinámica del tráfico. Por tanto, dado que desde el punto de vista del tráfico ninguna de estas dos propuestas sobresale por encima de la otra, lo más lógico es optar por la opción más económica como la propuesta definitiva. Siguiendo la notación introducida en su correspondiente apartado la alternativa más barata y eficiente es la “solución B”, en la cual simplemente invirtiendo las actuales entrada y salida del aparcamiento el flujo de coches mejora en un 25 % respecto al flujo actual.

A pesar de que el modelo computacional utilizado para estudiar las soluciones describe adecuadamente la influencia del aparcamiento y además tiene en cuenta la presencia del paso de cebrera a 10 metros de éste, no tiene en consideración que en la realidad un 7 % de los vehículos son autobuses. Ya se vió que los autobuses son muy importantes en la dinámica del tráfico, puesto que además de influir tanto en el flujo como en la velocidad su presencia hace que el comportamiento del tráfico sea diferente. De este modo, en vez de tener muchos huecos en la carretera y movimientos rápidos y acelerados, la dinámica general es más lenta pero a su vez más uniforme, con una mayor densidad de automóviles y un comportamiento más ordenado del tráfico. Por tanto, cabe esperar que si se tiene en cuenta la presencia de buses las soluciones propuestas muestren cambios, así que tras realizar dichas simulaciones otra vez pero con autobuses los resultados obtenidos son los que se muestran en la tabla.

Tal y como se preveía, los autobuses influyen significativamente en el tráfico y por ello se deben considerar para dar con la configuración del tráfico que agilice el flujo tanto cuanto sea posible. En lo que a los resultados se refiere, en primer lugar hay que destacar que incluso con autobuses en modelo utilizado describe bien el sistema real, ya que los resultados obtenidos en la “solución A” apenas difieren de los experimentales en un 7 %. Por otra parte, en cuanto a las dos otras alternativas los resultados obtenidos son distintos en cada caso, a diferencia de lo que se había obtenido en ausencia de buses. A pesar de que

Cuadro 1: Resultados de soluciones con autobuses

	Solución A	Solución B	Solución C
Flujo(coches/min)	13,2	15,9	13,8
Velocidad(km/h)	11,5	30,24	12,22
Densidad(coches/m)	0,073	0,033	0,07

presenta una menor densidad, la “solución B” es la única que muestra una mejora apreciable (17 %) en el flujo de vehículos gracias a la alta velocidad que tienen los coches en la vía. De todas formas, si hay autobuses en la carretera la mejora relativa que se obtiene con las soluciones o alternativas propuestas es mucho menor que si dichos autobuses no están, por ello, la configuración que terminará con los atascos en el campus pasa por desacoplar totalmente autobuses y coches. En conclusión, la solución definitiva se presenta como sigue. Por una parte, para solucionar el problema con los autobuses es imprescindible que sólo los coches entren por la puerta principal, llenando los autobuses por el recién estrenado tramo *D*. De esta manera autobuses y coches se encuentran totalmente desacoplados; esto es, no interaccionan entre sí, por lo que la presencia de buses no influye negativamente en el tráfico del campus. Por otra parte, con el fin de evitar el colapso en la entrada del aparcamiento es necesario invertir la entrada y la salida del aparcamiento, del mismo modo que ya se hizo en la “solución B” presentada antes. Así se logra mejorar el flujo a la entrada del campus en un 25 %, acabando casi por completo con los atascos. Además, estos cambios favorecen a los autobuses que ahora tienen un carril exclusivo, lo cual incitaría a todo tipo de usuarios a hacer un mayor uso del transporte público. Para terminar, es de destacar el bajo coste económico que supondría llevar a cabo estas mejoras, ya que despreciando cambios de la señalización y similares el único cambio importante es el de convertir el tramo *D* en una vía de entrada, por supuesto, con su correspondiente acceso desde la carretera que rodea el campus.

Agradecimientos

Especiales agradecimientos para Iñigo Etxebarria (UPV-EHU), tutor de este trabajo, puesto que gracias a él realizar este trabajo a distancia (desde la Universidad de Santiago de Compostela) no ha supuesto ningún problema. Nombrar también a Antton Azkargorta y José Luis Herrero por su implicación en el trabajo, ya que ellos han sido los responsables de tomar las medidas experimentales. Finalmente, saludar a Asier y a Estitxu, porque de no ser por ellos no habría estudiado esta carrera.

Referencias

- [1] K. Nagel, Michael Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique* 12 (1992) 2221-2229
- [2] S. Wolfram. *A New Kind Of Science* (2002). Wolfram Media, Inc.
- [3] Javier Novoa Cataño. Análisis de la Probabilidad de Accidentes Vehiculares en un Modelo Propuesto de Flujo de Tráfico Vehicular Multi-Carril. Centro de Investigación en Computación. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F 2007
- [4] Kai Nagel, Dietrich E. Wolf, Peter Wagner, Patrice Simon. Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach. *Physical Review E* 58 2 (1998) 1425-1436
- [5] Sven Maerivoet, Bart De Moor. Cellular automata models of road traffic. *Physics Reports* 419 (2005) 1-64
- [6] Takashi Nagatani. The physics of traffic jams. *Reports On Progress In Physics* 65 (2002) 1331-1386
- [7] Dietrich E. Wolf. Cellular automata for traffic simulations. *Physica A* 263 (1999) 438-451
- [8] Ozan K. Tonguz, Wantanee Viriyasitavat, Fan Bai. Modeling urban traffic, a cellular automata approach. *IEEE Communications Magazine* 0163-6804 (2009) 142-150