

Aplicaciones de tráfico, ¿el fin de la congestión?

Sebastián Santocono, Diego Thomson *

Octubre, 2017

Resumen

El presente trabajo adapta el Bar Attendance Model (Arthur, 1994) a la toma de decisiones respecto a la utilización de diversos caminos disponibles por parte de conductores automovilísticos, con el objetivo de analizar cómo influyen en la ocupación de los diferentes trayectos el desarrollo y la propagación del uso de aplicación de tráfico del estilo de wazeTM o Google MapsTM.

Veremos que, gracias al impacto que tienen sobre la forma en que los conductores toman la decisión de optar por un camino u otro, este tipo de programas ayuda a que la ocupación de cada alternativa converja hacia aquella que los conductores y la sociedad consideran óptima.

*Trabajo final de la materia Racionalidad Acotada, perteneciente a la Maestría en Economía de la Universidad de San Andrés.

1. Introducción

En los últimos años, especialmente desde principios de los años noventa, el aumento del tránsito vial ha causado, particularmente en las grandes ciudades, más congestión, demoras, accidentes y problemas ambientales. Ese aumento explosivo surge de un mayor acceso al automóvil -al elevarse el poder adquisitivo de las clases de ingresos medios- más oferta de autos usados, crecimiento poblacional, menor cantidad de habitantes por hogar y escasa aplicación de políticas enfocadas en el transporte urbano.

La palabra “congestión” es utilizada frecuentemente en el contexto del tránsito vehicular, tanto por expertos en el tema como por los ciudadanos en general. La Real Academia Española la define como “acción y efecto de congestionar o congestionarse”, en tanto que “congestionar” representa la acción de obstruir o entorpecer el paso, la circulación o el movimiento de algo. Cuando, como en nuestro contexto, ese algo es el tránsito vehicular, se entiende a la congestión como la condición en que existen muchos vehículos circulando y cada uno de ellos avanza lenta e irregularmente.

Estas definiciones son de carácter subjetivo y no proporcionan precisión suficiente para distinguir exactamente cuándo comenzamos a estar en presencia de congestión. La causa fundamental de la congestión es la fricción entre los vehículos en el flujo de tránsito. Hasta un cierto nivel de tráfico, los vehículos pueden circular a una velocidad relativamente libre, determinada por los límites de velocidad, la frecuencia de las intersecciones, etcétera. Sin embargo, a volúmenes mayores, cada vehículo adicional estorba el desplazamiento de los demás. Es allí entonces que comienza a tener lugar el fenómeno de la congestión.

Entonces, una posible definición objetiva sería: “La congestión es la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás”. Tomando esta definición, restaría detectar la ocupación que una ruta, calle, avenida o autopista tiene al momento en que ese fenómeno comienza a tener lugar.

La modelización del flujo de tráfico se inició a mediados de la década del '50, cuando Lighthill y Whitham (1955) presentaron un modelo basado en la analogía entre los vehículos en el flujo de tráfico y las partículas en un fluido. Pero, incluso los textos especializados encuentran dificultades a la hora de ofrecer definiciones muy rigurosas de la congestión. Dos renombrados especialistas en el tema del modelaje de transporte consideran que “surge la congestión en condiciones en que la demanda se acerca a la capacidad de la infraestructura transitada y el tiempo de tránsito aumenta a un valor muy superior al que rige en condiciones de baja demanda” (Ortúzar y Willumsen, 1994). Si bien refleja la percepción de la ciudadanía, esta definición no propone límites exactos para el inicio del fenómeno.

Un intento de definir el término en forma precisa y concordante con la percepción habitual fue el llevado a cabo en el marco de un proyecto de ley chileno destinado a implantar la tarificación vial¹. Como se pretendía evitar la discrecionalidad de las autoridades, la definición fue muy taxativa. Se declaraba congestionada aquella vía en la cual, en más de la mitad de su extensión total, considerando tramos no necesariamente consecutivos, la velocidad media espacial del flujo era inferior al 40 % de la velocidad en régimen libre. Esta condición debería verificarse al menos durante cuatro horas diarias entre martes y jueves, mediante mediciones hechas en cuatro semanas seguidas entre marzo y diciembre del año en cuestión. También se consideró una definición exacta para zonas congestionadas. La definición fue quizás demasiado precisa y de difícil aplicación práctica (aunque hasta ahora no ha sido necesario siquiera intentar aplicarla, pues el proyecto no recibió aprobación legislativa).

En la Ciudad de Buenos Aires, cada vez hay más autos y la circulación, principalmente durante las horas pico, resulta complicada. No sólo las principales arterias que llevan a la zona de mayor concentración de oficinas están repletas de automóviles, sino que también otros caminos alternativos presentan el mismo inconveniente. Buenos Aires está organizada de manera tal que la gran mayoría de la actividad económica se concentra en la zona céntrica y, dado que los horarios de ingreso a trabajar son comunes a la mayoría de la gente, es normal que las principales vías de acceso a la ciudad y a las áreas de mayor actividad laboral estén fuertemente transitadas. Incluso, muchas firmas están relocalizando sus oficinas hacia la zona norte de la ciudad o Parque Patricios, para tratar de lograr que sus empleados eviten este tipo de complicaciones.

Por lo general, las ciudades cuentan con una facilidad para lidiar con problemas del estilo de la congestión de tráfico: su característica inherente es el dinamismo, pueden transformarse desde las bases hasta los detalles más ínfimos. Sin embargo, en el caso de Buenos Aires, el Código de Planeamiento Urbano, aquel que regula la organización del tejido edilicio y la distribución de usos de suelo, rige sin modificaciones desde 1977, pese a que existen proyectos que buscan renovarlo a través de la inclusión de criterios propios de la actualidad tales como, por ejemplo, la sustentabilidad.

El transporte público también ha cambiado. Anteriormente el foco estaba puesto en la construcción de autopistas hacia el centro, en un contexto donde la gente tendía a mudarse hacia las afueras. Hoy en día ocurre exactamente lo contrario: las nuevas generaciones quieren vivir cerca de su lugar de trabajo, para evitar perder rutinariamente una gran cantidad de tiempo realizando traslados significativos.

A partir de esto, la idea que impera es la de evitar el concepto de “zoning”. Es decir, evitar pensar en las diferentes áreas de las metrópolis como compartimentos

¹Fuente: <http://www.latercera.com/noticia/tarificacion-vial-la-otra-carta-del-gobierno-para-combatir-la-congestion>

estancos claramente divididos según su principal “uso” como el trabajo o la residencia. La búsqueda general yace sobre impulsar las áreas de usos mixtos y lograr el objetivo de que nadie tarde más de 30 minutos en movilizarse de su casa al trabajo.

Otro ejemplo de cómo ha cambiado la forma en que los individuos se relacionan con la ciudad en la que viven y cómo deciden movilizarse diariamente para cumplir con sus obligaciones, es el uso difundido de las aplicaciones de tráfico en dispositivos celulares, entre las que se destacan WazeTM y Google MapsTM. Estas aplicaciones no sólo cumplen el rol de un típico GPS sino que también ayudan a cada individuo a decidir qué camino tomar a la hora de trasladarse, por ejemplo, de su casa al trabajo.

Este tipo de herramientas busca transformar radicalmente la forma en que los usuarios del transporte (público o privado) se desenvuelven en las distintas ciudades del planeta. Por una parte, recopilan una inmensa cantidad de información que es ingresada por los usuarios de la aplicación ya sea explícita, como las alertas de accidentes o automóviles detenidos, o implícitamente, como la velocidad a la que están transitando. Luego, a través de diversos algoritmos estiman el camino más rápido para el viaje a realizar por el usuario y lo comparten con el conductor. Así, suponiendo que los usuarios obedecen las sugerencias de estas aplicaciones, las mismas acaban llevando a cabo una tarea fundamental para evitar el fenómeno de la congestión: dirigir a los automovilistas hacia los caminos que no se encuentran congestionados.

Es precisamente analizar este impacto que las aplicaciones de tráfico y la expansión de su uso tienen la tarea que nos compete en el presente trabajo. Para ello, nos basaremos en el *Bar Attendance Model* (Arthur, 1994), el cual adaptaremos a la problemática a tratar. Problemática que, al igual que la asistencia o no a un bar, está caracterizada porque los agentes involucrados tienen una percepción de la ocupación óptima de los caminos (el bar) y para intentar que esa ocupación sea la efectiva se lleva a cabo un proceso de coordinación y auto-organización donde la decisión de cada agente afecta a todo el resto y la estabilidad es alcanzada cuando todas las decisiones son consistentes entre sí.

2. El Modelo

A continuación, describiremos la dinámica detrás del *Bar Attendance Model* original. Luego, expondremos la interpretación alternativa que haremos del mismo con el fin de aplicarlo al problema del tránsito vehicular.

2.1 El *Bar Attendance Model*

Siguiendo a Heymann, Perazzo y Zimmermann (2013), podemos decir que el modelo de concurrencia al Bar está conformado por N parroquianos que concurren regularmente a un Bar cuya capacidad es fija. Además, los N agentes comparten el siguiente parecer: para ser agradable, el grado de ocupación del bar debe estar comprendido entre dos umbrales. Más precisamente, la ocupación debe ser mayor que un umbral mínimo para que el ambiente esté animado y menor que uno máximo para evitar aglomeraciones.

En este contexto, cada agente obtiene una utilidad positiva si toma una decisión acertada. Es decir, cuando concurre y la ocupación que observa está comprendida entre los dos umbrales y cuando se abstiene de acudir y la fracción de concurrentes estuvo efectivamente fuera de esos márgenes. Si la decisión tomada no fue, siguiendo la misma lógica, acertada obtienen en cambio una utilidad negativa.

Uno de los supuestos detrás es que todos los parroquianos conocen la historia previa de concurrencias al Bar y, con esto en mente, cada uno debe decidir, de manera independiente, si va o no al local en un día en particular. Es decir, según el modelo los parroquianos toman decisiones individuales basadas en valores agregados (globales) para todo el sistema, valores que se encuentran a disposición de todos los agentes por igual.

Dicho esto, la dinámica de la toma de decisiones por parte de los agentes es la siguiente: cada uno de los N agentes posee una población P de potenciales estrategias de concurrencia (o no) al bar para los m días de la semana. Cada estrategia puede codificarse, entonces, como un genoma de m números c_i con $c_i \in \{1, 0\}; i = 1, 2, \dots, m$ donde que c_i sea igual a 1 implica que de acuerdo a esa estrategia el agente acude al bar en el día i de la semana mientras que para aquellos días i en los que c_i sea igual a 0 el agente se abstiene de concurrir al bar. Durante los m días de la semana el agente aplica una de las estrategias que tiene a su disposición. Concluida la semana, calcula la utilidad que le reportó haber aplicado esa estrategia y la compara con la que le hubiera reportado aplicar las otras $P-1$ estrategias alternativas, considerando que el accionar del resto de los individuos permanece constante.

De esta manera, el sistema genera N procesos evolutivos independientes. A su vez, para que el sistema se organice en un contexto de este tipo y con el fin de evitar que los comportamientos colectivos, a través de la generación de efectos de “avalancha” (que podrían llevar al sistema a oscilar sin rumbo), nieguen aprendizajes individuales el modelo supone que las revisiones de estrategias individuales ocurren de manera asincrónica. Esto se logra estableciendo que, al finalizar la semana, cada agente cambiará eventualmente su estrategia con cierta probabilidad.

Cabe mencionar, antes de sumergirnos en la interpretación alternativa que le daremos al modelo, que en el marco de la implementación computacional sugerida por Heymann, Perazzo y Zimmermann (2013) el modelo trabaja exclusivamente con un umbral máximo de ocupación, descartando el umbral de ocupación mínima. Es decir, a las veces de la práctica los agentes percibirán utilidad positiva si concurren al bar un día que el mismo no se encontraba exageradamente concurrido o si evitaron acercarse al mismo cuando éste contaba con una fuerte asistencia. Como veremos, este punto es fundamental para darle sentido a nuestra interpretación alternativa, enfocada en el tránsito vehicular y, particularmente, en la congestión.

2.2. Interpretación adaptada al problema del tránsito vehicular

Una reinterpretación del *Bar Attendance Model* es necesaria para los fines del análisis que pretendemos llevar a cabo en este trabajo.

Nuestro escenario consiste de N agentes habitantes de una zona suburbana que cada día deben trasladarse hacia el centro de la ciudad para desempeñar sus tareas laborales. Todos los agentes disponen de dos avenidas alternativas para realizar su viaje, la Avenida X y la Avenida Y. Además, conocen el historial de ocupación de cada alternativa. A su vez, reciben información de la ocupación que cada avenida ha presentado al finalizar el día ya sea a través de la propia observación del tráfico en la alternativa por la que optaron o a través de las aplicaciones de tráfico, cuando el uso de las mismas está difundido entre los individuos.

En el escenario más básico, coincidente con aquel en el que el uso de aplicaciones de tráfico no tiene lugar entre los conductores, los automovilistas optan por una u otra avenida para realizar la totalidad de su viaje puesto que no cuentan con información concluyente que los haga optar por intercalar ambas avenidas de acuerdo al nivel de tráfico que ambas presentan a lo largo de su trama. Sin embargo, combinarlas se tornará posible para los agentes toda vez que el uso de aplicaciones de tráfico con información en tiempo real comienza a difundirse dentro del sistema. Esta será una de las consecuencias que trae consigo el mayor uso de programas de este tipo: la mayor disponibilidad de estrategias por parte de los agentes.

Una cuestión fundamental para proporcionar las condiciones que permiten que el modelo cuente con la característica descrita en el párrafo anterior es el trato que le daremos a los períodos de tiempo. En nuestro contexto, la decisión de los conductores tiene una extensión total de 1 día. Es decir, la estrategia que escoja un agente la aplicará por un día y recién al finalizar el mismo, contando con la información de ocupación que le ofrecen, dependiendo el escenario, la propia experiencia vivida ese día o la aplicación

de tráfico a la que consulta cada día para decidir su trayecto, revisará su estrategia para el día siguiente con cierta probabilidad.

Nótese entonces que para fines interpretativos el período de tiempo más extenso y sobre el cual se aplica la estrategia, que en el modelo del bar era una semana de m días, ahora es un día. Sin embargo, ese día estará a su vez dividido en m momentos. Este parámetro m será el que nos permita generar la diferenciación señalada en términos de la cantidad de estrategias disponibles entre los diferentes escenarios.

Para el caso en el que los automovilistas optan por una de las avenidas para realizar todo su recorrido porque no cuentan con aplicaciones de tráfico que justifiquen la decisión de alternar las opciones a lo largo de la trama, el parámetro m será igual a 1 y, lógicamente, las estrategias disponibles meramente 2 (tomar una avenida o la otra, para todo el viaje). Sin embargo, cuando los conductores comienzan a disponer de programas que, gracias a la información que concentran sobre el estado del tránsito en tiempo real, le sugieren incluso durante el viaje si continuar por la avenida en la que se encuentran, desviarse hacia la opción alternativa o incluso alternar las opciones (avanzando inicialmente por una de las avenidas para luego continuar su camino en la alternativa y sobre el final retomar la avenida utilizada inicialmente, por ejemplo) el mundo de estrategias disponibles se expande significativamente. Esta virtud de poder alternar las avenidas durante el viaje posibilita la fragmentación del mismo, cuestión que captaremos con $m > 1$ para aquellos escenarios con uso difundido de aplicaciones de tráfico. En ese caso, la estrategia especificará para los m momentos qué avenida toma el conductor -de manera análoga al caso en que especificaba la asistencia o ausencia al bar- excepto que ahora $c_i = 1$ implica optar por la avenida que, como ya mencionamos, denominaremos Avenida X mientras que $c_i = 0$ connota escoger la avenida alternativa, la Avenida Y.

Otra de las cuestiones que se verán influenciadas por el uso de aplicaciones de tráfico en nuestra versión del modelo es la probabilidad con la que cada agente revisa su estrategia al finalizar el día. Ese parámetro al que llamaremos *pevol* en la implementación computacional será, intuitivamente, mayor cuando el uso de este tipo de programas rige entre los agentes ya que gracias a la disponibilidad de los mismos la tendencia por parte de los automovilistas a modificar su conducta en términos de la ruta a elegir es mayor que cuando, en contraposición, la decisión dependía de su propia voluntad y no era favorecida por la sugerencia de ninguna aplicación móvil. En otras palabras, antes de existir las aplicaciones de tráfico cada conductor tendía a tomar cierta avenida por costumbre y la probabilidad de revisar su elección era menor a la que se observa en un contexto donde el hecho de contar con *Waze*TM o *Google Maps*TM incentiva al agente a modificar su estrategia como consecuencia de dejarse llevar por lo que alguno de estos programas le indica.

Como podemos comenzar a notar, estos dos parámetros (m y $pevol$) tendrán un rol esencial en nuestro análisis, sobre todo porque actúan como los factores que se ven modificados por la incorporación de las aplicaciones de tráfico en la rutina de los conductores, lo cual los hace fundamentales para permitirnos establecer una comparación entre la situación de la congestión en ambos escenarios -aquel en que los automovilistas todavía no incorporaron estas herramientas y aquel en el que sí forman parte de la cotidianeidad de los agentes.

Por último, antes de pasar a exponer la implementación computacional del modelo para luego adentrarnos en los resultados obtenidos para los diferentes escenarios, es menester explicitar el valor que tendrá ocupación umbral máxima percibida por los agentes como aquella a partir de la cual comienza a haber congestión. El supuesto con el que trabajaremos en este sentido es que ambas avenidas tienen similar dimensión y, por ende, una capacidad de alojar en su trama a una cantidad equivalente de automóviles. Asumir esto nos lleva a que, si la ocupación de una de las avenidas es superior al 50 % nos encontremos en presencia de una situación ineficiente, dada la homogeneidad descrita entre las avenidas. Por lo tanto, y porque es un valor que nos asegura evitar que tenga lugar el fenómeno de la congestión en ambas avenidas, estableceremos en 0.5 al parámetro *occup*, que representa el valor umbral máximo que los agentes coinciden como aquel hasta el cual la Avenida X no se encuentra congestionada. Como el sistema es complementario y las alternativas son exclusivamente dos -la Avenida X y la Avenida Y- de este modo nos aseguramos que el valor umbral de ocupación implícito que los agentes toleran en la Avenida Y sea, también 0.5, en tanto es 1 menos la ocupación de la Avenida X (0.5).

Veamos entonces a continuación cómo aplicaremos computacionalmente este modelo para el tránsito vehicular. Posteriormente, analizaremos los resultados obtenidos por la simulación en los diferentes escenarios y notaremos los efectos que el uso de aplicaciones de tráfico pueden tener para asegurar que la ocupación en ambas avenidas se sitúe en torno al 50 %, lo cual evita que tenga lugar congestión alguna.

3. Implementación computacional

Recorramos a continuación el código de Matlab para la aplicación computacional del modelo descrito en la sección previa. Cabe mencionar que la parametrización asociada con el código Matlab expuesto debajo es aquella válida para el escenario representativo de aquellos sin uso difundido de aplicaciones de tráfico, cuyos resultados analizaremos en el *Apartado 4.1*. Por tal motivo, en el *Cuadro 1* exponemos las diversas parametrizaciones asociadas con los diferentes escenarios cuyos resultados analizaremos en los dos primeros apartados de la *Sección 4*, parametrizaciones que responden a las

características inherentes a cada escenario, en línea con lo argumentado en la *Sección 2*.

Código Matlab para el *Bar Attendance Model* aplicado a la problemática del tránsito vehicular (parametrización del escenario sin uso difundido de aplicaciones de tráfico):

```
1
2 function [stat ,plan ,a] = bam_ga(occup ,npop ,m, niter ,pevol)
3
4     nplanes = 2; % Cantidad de planes alternativos por agente
5     if ( nargin < 2)
6         pevol=0.5; occup=0.5; npop=10; m=1; niter=90;
7     end
8
9     % Genera poblacion de agentes con su poblacion de planes
10    % Usar la Avenida X es 1
11    % Usar la Avenida Y es 0
12    for k=1:npop ,
13        a(k) = agent_new(k ,nplanes ,m);
14    end
15
16    stat.concu = [];
17    stat.ocupa_m = [];
18    stat.ocupa_dia = [];
19    stat.fitness_medio = [];
20
21    for iter = 0:niter*m,
22
23        % Momento del viaje
24        moment = mod(iter ,m)+1;
25
26        % Busca los planes para todas las estrategias del
27        % momento del viaje por cada agente (en la
28        % columna se registra lo que dice cada plan para
29        % ese momento)
30        xav = zeros(nplanes ,npop);
31        for p=1:nplanes ,
32            for k=1:npop ,
33                xav(p,k) = a(k).genome.chromos(p,
```

```

moment);
31         end
32     end
33
34     % Primera fila es la accion vigente de cada agente
35     xaves = xav(1,:);
36     mxav = mean(xaves);
37     stat.occupa_m = [stat.occupa_m mxav];
38
39     % Si la ocupacion supera el umbral, ganan los que
40     % optaron por la Avenida Y
41     if (mean(xaves)>occup)
42         wins=1-xav;
43     else
44         wins=xav;
45     end
46
47     % Actualiza el fitness de cada plan de cada agente
48     for k=1:npop,
49         a(k).genome.fitness = a(k).genome.fitness +
50             wins(:,k);
51     end
52
53     % Al finalizar el dia se actualizan los planes
54     if moment == m,
55
56         % Registra la ocupacion promedio diaria
57         mo=mean(stat.occupa_m(end-m+1:end));
58         stat.occupa_dia=[stat.occupa_dia mo];
59
60         % Registra la concurrencia planeada promedio
61         plan=zeros(npop,m);
62         for k=1:npop,
63             plan(k,:)=a(k).genome.chromos(1,:);
64         end
65         mplan=mean(plan);
66         stat.concu=[stat.concu mean(mplan)];
67
68         % Registra el fitness promedio del plan
69         % vigente

```

```

67         ft=zeros(1,npop);
68         for k=1:npop,
69             ft(k)=a(k).genome.fitness(1);
70         end
71         stat.fitness_medio=[stat.fitness_medio mean(ft
72             )];
73
74         for k=1:npop,
75             if rand(1,1)<pevol
76                 % Devuelve el genoma ordenado por
77                 fitness
78                 a(k).genome = ga_evolve(a(k).genome);
79                 % Resetea el fitness
80                 a(k).genome.fitness=zeros(nplanes,1);
81             end
82         end
83     end
84     stat.fitness_medio
85 end
86
87
88 % Define un nuevo agente
89 function agent = agent_new(i,nplanes,m)
90     agent.name=i;
91     agent.genome=ga_binary_new(nplanes,m);
92     agent.score=0;
93
94 end

```

Nótese que los parámetros *npop* y *nplanes* se refieren al número de agentes (N) y a la cantidad de estrategias disponibles por cada agente (P), respectivamente.

Por su parte, *niter* responde al número de veces que se itera el proceso detrás del sistema. En nuestro caso, hace referencia a la cantidad de días laborales a lo largo de los cuales tiene lugar el proceso evolutivo de las estrategias individuales de los agentes.

Cuadro 1: Parametrización de los diferentes escenarios.

Escenario (aplicaciones de tráfico)	$n_{pop} = N$	$occup$	n_{iter}	$n_{planes} = P$	$pevol$	m
Ausencia de aplicaciones de tráfico	10	0.5	90	2	0.50	1
Presencia de aplicaciones de tráfico	10	0.5	90	8	0.75	10

4. Resultados

En la presente sección, analizaremos los resultados obtenidos en lo que respecta a la evolución de la ocupación diaria promedio con el correr de los días para los diferentes escenarios de interés. A saber, uno representativo del caso sin utilización de aplicaciones de tráfico, otro que cumple el mismo rol pero para el contexto con utilización de las mismas y dos escenarios alternativos para cada marco. La simulación de estos escenarios alternativos nos permitirá comprender con mayor profundidad el rol de los tres parámetros cuyos valores alternarán a lo largo de los escenarios. Léase, la probabilidad de que cada agente revise su estrategia al finalizar el día ($pevol$), la cantidad de momentos en los que se fracciona el viaje diario (m) y el número de estrategias de las que disponen los agentes (n_{planes}).

4.1. Escenario sin utilización de aplicaciones de tráfico

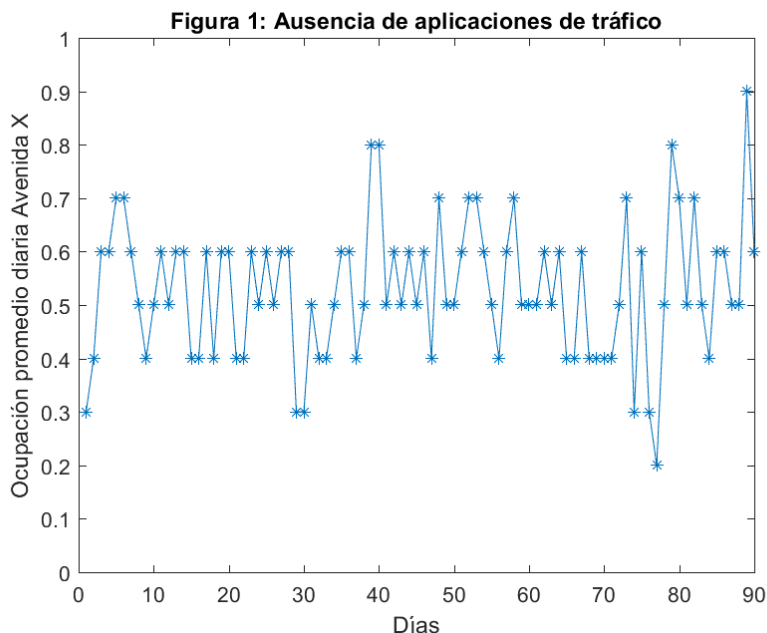
Comencemos por revisar lo arrojado por el modelo cuando la parametrización está en línea con la del *Cuadro 2*. Es decir, cuando el uso de aplicaciones de tráfico no está difundido entre los agentes.

Cuadro 2: Parametrización del escenario con ausencia de aplicaciones de tráfico.

Parámetro	$n_{pop} = N$	$occup$	n_{iter}	$n_{planes} = P$	$pevol$	m
Valor	10	0.5	90	2	0.5	1

Como hemos mencionado en apartados anteriores, la ausencia de aplicaciones de tráfico está reflejada en los valores que toman los parámetros m , que es igual a 1 en este caso porque al no contar con la información en tiempo real que le proveerían estas aplicaciones los conductores no intercalan avenidas durante su recorrido sino que optan por una avenida para realizar la totalidad de su viaje, causando así que cada viaje diario cuente con un único momento decisorio (el comienzo del mismo); n_{planes} , igual a 2 porque el único momento decisorio conlleva a contar exclusivamente con 2 opciones para realizar el viaje: optar por la Avenida X en toda la trama u optar por la Avenida Y para realizar la totalidad del recorrido; y $pevol$ que se ubica en el relativamente bajo valor de 0.5, equivalente a decir que cada agente tira una moneda para decidir si revisar

su estrategia de cara al próximo día o que, a nivel agregado, tan sólo el 50 % de los conductores se plantean analizar si optaron por el camino óptimo mientras el resto volverá a optar por su “camino conocido” el día siguiente.



La *Figura 1* resume los resultados de la simulación del modelo en el escenario sin uso de aplicaciones de tráfico. Es notorio que la ocupación promedio diaria de la Avenida X no converge al máximo valor considerado aceptable por los agentes (0.5) sino que, por el contrario, esta medida oscila ampliamente con el correr de los días ubicándose muchos días tanto en torno a valores cercanos o superiores a 0.7 -que implican congestión en la Avenida X- como alrededor de valores cercanos o inferiores a 0.3 -que, implícitamente, traen aparejados congestión en la Avenida Y.

Dentro de esa oscilación permanente que se observa en la ocupación diaria promedio a lo largo de los días, pueden detectarse días en los que la Avenida X se encuentra siendo utilizada en una medida óptima o cercana a la misma. Sin embargo, esto es una mera consecuencia de la fuerte aleatoriedad que caracteriza a la ocupación diaria en este contexto en el cual se observa con claridad que no acaba teniendo lugar un proceso de aprendizaje tal que lleve al sistema a la convergencia del nivel de ocupación diaria promedio en torno al valor óptimo de 0.5.

4.2. Escenario con difusión del uso de aplicaciones de tráfico

Enfoquémonos ahora en observar los resultados provistos por el modelo en el caso en que la parametrización se condice con aquella expuesta en el *Cuadro 3*. Es decir,

cuando los parámetros reflejan que el uso de aplicaciones de tráfico está difundido entre los agentes.

Cuadro 3: Parametrización del escenario con presencia de aplicaciones de tráfico.

Parámetro	$n_{pop} = N$	$occup$	$niter$	$nplanes = P$	$pevol$	m
Valor	10	0.5	90	8	0.75	10

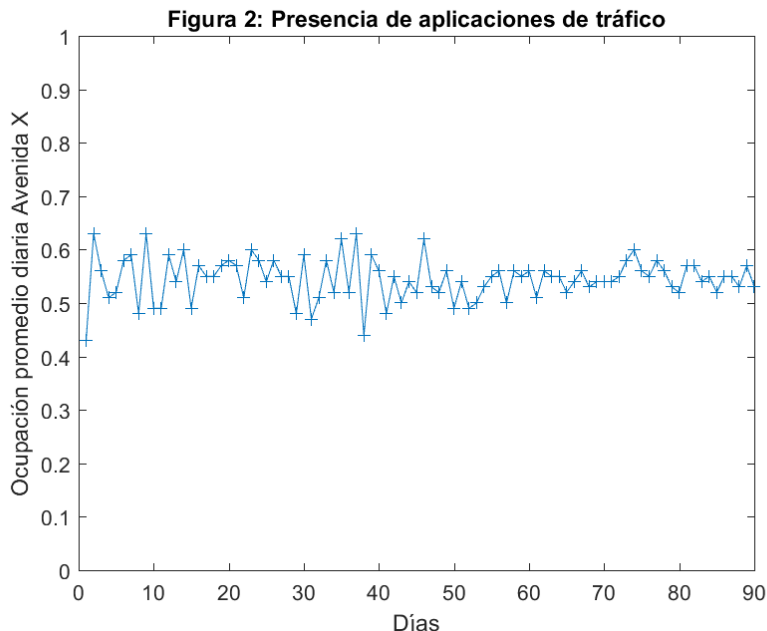
Como hemos discutido, los parámetros a través de los cuales esa difusión del uso de aplicaciones de tráfico tendrá influencia en el modelo son $nplanes$, $pevol$ y m . Es por esto que cada uno de ellos se ve modificado en esta parametrización respecto a aquella vinculada con el escenario del apartado 4.1.

Puntualmente, $pevol$ se ubica ahora en el valor de 0.75. Por tal motivo, ya no estamos en condiciones de interpretar que cada conductor tira una moneda al finalizar el día para decidir si revisaba su elección de cara al próximo día (o que, a nivel agregado, tan sólo el 50 % de los conductores se plantean analizar si optaron por el camino óptimo mientras el resto optaba nuevamente por su camino conocido el día siguiente). Ahora, gracias a contar con la información que las aplicaciones de tráfico nuclean respecto a la ocupación de las diferentes alternativas, los incentivos a revisar el plan para el día siguiente son mayores. Dentro del modelo, esto repercute en la mayor probabilidad de que cada agente efectivamente se replantee el recorrido. En esta instancia, asumiremos que $pevol$ se ve incrementada en un 50 % en referencia al valor del escenario sin aplicaciones de tráfico, alcanzando el valor de 0.75. En términos agregados, esto es análogo a decir que $\frac{3}{4}$ de los individuos están en condiciones de replantear su elección de cara al día siguiente.

Simultáneamente, m deja de ser igual a 1 en este escenario. Gracias a que los agentes cuentan con información en tiempo real provisto por las aplicaciones de tráfico, existen incentivos a intercalar avenidas durante el recorrido de acuerdo a la conveniencia. Así, a diferencia del caso anterior en el que optaban por una avenida para realizar la totalidad de su viaje, ahora el recorrido puede contar con una mayor cantidad de “momentos decisivos”, momentos en los cuales el conductor puede optar por cada una de las avenidas para, como hemos comentado, intercalarlas. Más precisamente, hemos optado en esta parametrización por fragmentar el viaje en 10 momentos ($m = 10$).

La incorporación de esta posibilidad de intercalar avenidas durante el recorrido impacta, a su vez, en el parámetro $nplanes$. Ahora, las estrategias disponibles por los agentes han dejado de ser exclusivamente 2 (optar por una de las avenidas durante todo el recorrido) para expandirse e incluir la posibilidad de llevar a cabo estrategias que efectivamente hagan uso de la posibilidad de variar la avenida elegida a lo largo de

los diferentes momentos del viaje. A las veces de esta parametrización, la cantidad de estrategias disponibles para cada agente será de 8 ($nplanes = 8$).



Como puede observarse en la *Figura 2*, los cambios descritos en los parámetros que dan lugar al escenario con uso de aplicaciones de tráfico permiten que el sistema converja hacia valores de ocupación de la Avenida X en torno al máximo aceptable para la visión de los conductores.

Luego de cierta volatilidad percibida en los primeros 30 días, volatilidad que es parte del proceso de aprendizaje individual que llevan a cabo los agentes, vemos que ya al adentrarse en la segunda mitad de las iteraciones el proceso ubica decididamente a la ocupación de la Avenida X en valores cercanos a 0.5. De hecho, ésta toma valores nunca superiores a 0.6 desde entonces y hasta el final de las iteraciones realizadas por el modelo, muestra clara de que el proceso estabiliza la ocupación en torno a 0.5, evitando de este modo la formación de congestión en ambas arterias.

Por un lado, la mayor probabilidad de que cada agente revise su elección al finalizar el día es un factor que influye esencialmente en favor de lograr que el aprendizaje individual tenga lugar y el sistema efectivamente evolucione y converja hacia el estado óptimo en tanto y en cuanto incrementa la predisposición del modelo a que los agentes realicen ese aprendizaje, al incrementar las chances de que efectivamente cada conductor se replantee su decisión de cara al día siguiente.

Por otra parte, la posibilidad de contar con mayor cantidad de estrategias como consecuencia de la división del recorrido que cada agente realiza en diferentes (en este

caso, 10) momentos juega un rol fundamental en pos de la convergencia al proveer a los agentes con un mayor abanico de opciones para llevar a cabo su recorrido. Así, esta nueva configuración facilita la eventual coordinación entre los diferentes planes individuales (debido a la mayor cantidad de alternativas por las que cada agente puede optar) y, de este modo, posibilita que la congestión de las avenidas acabe evitándose.

Cabe mencionar que es sólo cuando estas modificaciones operan en conjunto que el sistema converge hacia el máximo de ocupación tolerado por los automovilistas. Como notaremos en la siguiente sección, la modificación de *pevol* por sí solo en el escenario sin aplicaciones de tráfico no sería suficiente para lograr la convergencia. Asimismo, la modificación en la cantidad de momentos del recorrido y el incremento en la cantidad de estrategias disponibles que ésta trae aparejada no llevarían a que el modelo converja si no son acompañadas por un incremento en la probabilidad de que los agentes revisen sus decisiones.

4.3. Escenarios alternativos sin utilización de aplicaciones de tráfico

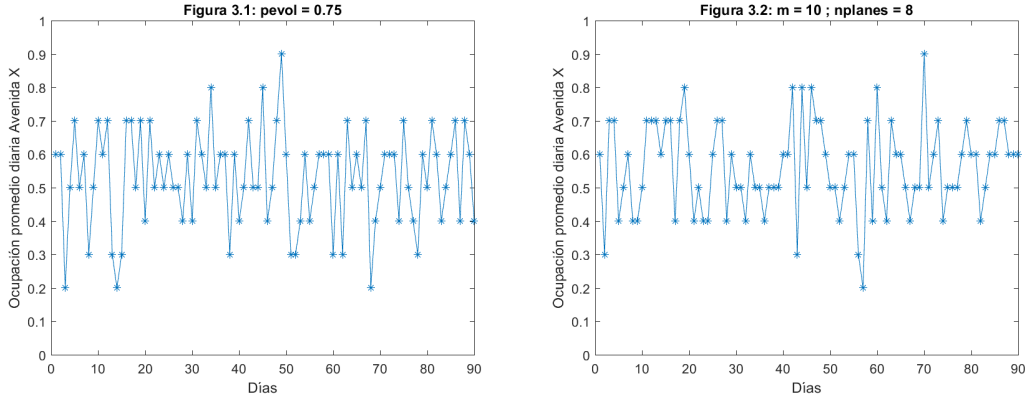
Como anticipamos en el apartado 4.2, la modificación de *pevol* por sí solo en el escenario sin aplicaciones de tráfico no sería suficiente para lograr la convergencia del mismo modo que la modificación en la cantidad de momentos del recorrido y el incremento en la cantidad de estrategias disponibles que ésta trae aparejada no llevarían a que el modelo converja si no son acompañadas por un incremento en la probabilidad de que los agentes revisen sus decisiones.

Estas nociones se corroboran en las simulaciones realizadas del modelo bajo las parametrizaciones explicitadas en el Cuadro 4. Ambas parametrizaciones son vinculables, de acuerdo a nuestra interpretación, con escenarios donde el uso de aplicaciones de tráfico no está difundido en tanto y en cuanto, por lo expuesto previamente, para hablar de difusión de la utilización de programas de este tipo tienen que darse cambios en los tres parámetros clave en línea con la dirección de las modificaciones presentadas en el apartado 4.2.

Cuadro 4: Parametrización de los escenarios alternativos con ausencia de aplicaciones de tráfico.

Parámetro	$n_{pop} = N$	$occup$	n_{iter}	$n_{planes} = P$	$pevol$	m
Figura 3.1	10	0.5	90	2	0.75	1
Figura 3.2	10	0.5	90	8	0.50	10

Figura 3: Escenarios alternativos sin presencia de aplicaciones de tráfico



De la contemplación del gráfico de la *Figura 3.1* se desprende el concepto con el que abrimos esta sección: partiendo del escenario representativo de ausencia de aplicaciones de tráfico, el incremento de la probabilidad de que cada agente revise sus planes al final del día no tiene consecuencias significativas sobre los resultados observados en aquel escenario original. Esto tiene sentido, puesto que la parametrización asociada a la simulación cuyos resultados se observan en la *Figura 3.1* responde a un escenario donde la difusión del uso de aplicaciones de tráfico sigue ausente.

Por su parte, observar la *Figura 3.2* nos confirma que lo mismo ocurre cuando, partiendo del escenario representativo de ausencia de aplicaciones de tráfico, incrementamos los “momentos decisorios” en que los agentes dividen su viaje y aumentamos, consecuentemente, la cantidad de planes de los que disponen. Estas modificaciones tampoco tienen consecuencias destacables sobre los resultados observados en el escenario sin utilización de aplicaciones de tránsito del apartado 4.1. En otras palabras, la ocupación de la Avenida X sigue fluctuando indefinidamente ubicándose en muchas oportunidades en valores que implican o bien congestión en ella misma o en la Avenida Y. Una vez más, esto tiene sentido dado que este escenario sigue representando un contexto en el cual el uso de aplicaciones de tráfico no está difundido entre los automovilistas.

4.3. Escenarios alternativos con difusión del uso de aplicaciones de tráfico

Para finalizar nuestro recorrido a lo largo de los diferentes escenarios propuestos, revisemos los resultados obtenidos al simular el modelo con dos parametrizaciones alternativas para contextos donde el uso de aplicaciones de tráfico se encuentra difundido entre los conductores.

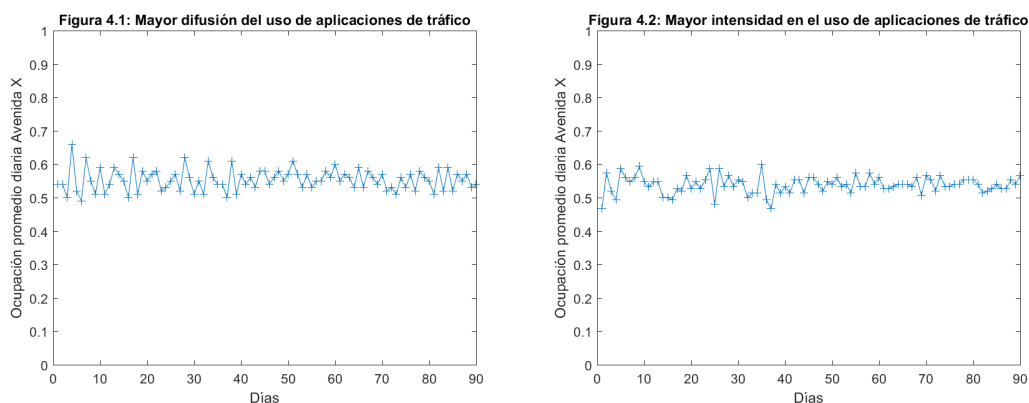
Cuadro 5: Parametrización de los escenarios alternativos con presencia de aplicaciones de tráfico.

Parámetro	$n_{pop} = N$	$occup$	n_{iter}	$n_{planes} = P$	$pevol$	m
Figura 4.1	10	0.5	90	2	0.80	1
Figura 4.2	10	0.5	90	10	0.75	15

La primera de estas alternativas, cuyos resultados podemos observar en la *Figura 4.1* consiste en plantear, siempre respecto al escenario base para el caso con presencia de aplicaciones de tráfico (el escenario presentado en la sección 4.2), una mayor difusión del uso de este tipo de programas entre los automovilistas. Para incorporar esto, el parámetro que da cuenta de la probabilidad con la que cada agente revisa su elección al finalizar la jornada toma un valor superior. Más precisamente, en este escenario con mayor difusión del uso de aplicaciones de tráfico $pevol$ es igual a 0.80. La interpretación de esta modificación de $pevol$ como reflejo de una utilización más arraigada entre los conductores de las aplicaciones de tráfico está comprendida por la lectura a nivel agregado que el parámetro en cuestión tiene en el marco del modelo. Ahora, a nivel agregado un 80 % de los individuos revisa su estrategia.

Esta mayor difusión, como podemos observar en la *Figura 4.1*, lleva al sistema a estabilizarse más prontamente². En esta ocasión, incluso antes de realizada la mitad de las iteraciones el sistema se encuentra notablemente estabilizado en torno a valores cercanos la ocupación máxima admitida por los agentes, 0.50.

Figura 4: Escenarios alternativos con presencia de aplicaciones de tráfico



La segunda de estas variantes, de cuya simulación damos cuenta en la *Figura 4.2* plantea, una vez más respecto al escenario de la sección 4.2, un uso más intenso de las aplicaciones de tránsito en tanto, al dividir el recorrido en una mayor cantidad

²Esta conclusión se desprende de comparar la *Figura 4.1* con la *Figura 2*.

de momentos ($m = 15$ en este escenario), los agentes están dispuestos a seguir las indicaciones brindadas por el programa incluso más detalladamente que antes. Es que, ahora, si la aplicación así lo sugiriera, los automovilistas que conforman el sistema tomarían a bien mudarse de avenida a lo largo del recorrido unas 15 veces (cuando antes este comportamiento estaba limitado a 10 oportunidades). Claro está que esta modificación amplía las alternativas de recorrido que pueden construirse. Para reflejar esto, de la mano con la modificación en m introducimos también un incremento en $nplanes$, el número de estrategias de las que efectivamente dispone cada agente.

De forma análoga a lo que ocurre con la mayor difusión, este uso más intenso de las aplicaciones de tráfico también llevaría al sistema a estabilizarse más rápidamente. Nuevamente, prestando atención a la *Figura 4.2*, podemos concluir que el sistema se encuentra fuertemente estabilizado alrededor de 0.50 antes que en el escenario representativo de uso difundido de aplicaciones de tránsito (ver *Figura 2*).

5. Conclusiones

La congestión de los caminos es, como remarcamos al comienzo de este trabajo, un fenómeno que azota a las principales ciudades del mundo de manera indiscriminada. Si bien desde los diferentes gobiernos de las urbes de este tipo han surgido planes, propuestas y medidas enfocados en combatir este flagelo, el mismo parece potenciarse con el tiempo de la mano del crecimiento en la flota automotriz, hasta volverse inmune a esas soluciones.

En este trabajo, el foco está en la coordinación de las decisiones de los conductores a la hora de optar por un camino como el factor causante de congestión en el contexto de nuestro modelo.

El mismo es una adaptación del *Bar Attendance Model* para el caso en que los agentes deciden entre tomar cierto camino (la Avenida X) u otro alternativo (la Avenida Y) a la hora de realizar el viaje diario desde el área de la ciudad en el cual residen y la zona donde trabajan.

Puntualmente, nuestro recorrido analizó la influencia que tiene la difusión del uso de aplicaciones de tráfico en el aprendizaje individual de los agentes y la coordinación agregada que de éste proceso se desprende.

Luego de analizar diferentes escenarios, estamos en condiciones de afirmar de forma concluyente que el modelo sugiere que el mayor uso de aplicaciones de este tipo mejora la coordinación de las elecciones de los automovilistas, facilitando así la convergencia

hacia un estado en el cual la ocupación de los diferentes caminos se ubica en torno al óptimo.

Más allá de cuán arraigado esté el uso de este tipo de aplicativos en los conductores, el hecho de que esta utilización tenga lugar ya nos asegura la convergencia hacia niveles de ocupación que no implican congestión en las avenidas de las que los agentes disponen para realizar su viaje.

La evidencia provista por las simulaciones realizadas del modelo propuesto, nos permite afirmar que las aplicaciones de tráfico pueden cumplir un rol importante y positivo en la lucha contra la congestión y en pos de un tránsito fluido en las grandes ciudades que reduzca el tiempo que los habitantes pierden pura y exclusivamente trasladándose a lo largo de las mismas.

Son dos mecanismos que actúan en conjunto aquellos a través de los cuales estas aplicaciones cumplen con este rol “anti-congestión”.

Por un lado, la mayor probabilidad de que cada agente revise su elección al finalizar el día influye esencialmente en favor de lograr que el aprendizaje individual tenga lugar y el sistema efectivamente evolucione y converja hacia el estado óptimo en tanto y en cuanto incrementa la predisposición del modelo a que los agentes realicen ese aprendizaje, al incrementar las chances de que efectivamente cada conductor se replantee su decisión de cara al día siguiente.

Por otra parte, la posibilidad de contar con mayor cantidad de estrategias como consecuencia de la división del recorrido que cada agente puede realizar en diferentes momentos toda vez que posee información en tiempo real que lo incentiva a alternar las opciones incluso durante el viaje, juega un rol fundamental en pos de la convergencia al proveer a los agentes con una mayor diversidad de opciones para concretar su traslado. Así, la eventual coordinación entre los diferentes planes individuales se ve facilitada y evitar la congestión se torna mucho más factible.

6. Referencias

Arthur, W. B. (1994). “Complexity in economic theory: Inductive reasoning and bounded rationality.” *AEA Papers and Proceedings*, Vol. 84, pp. 406-411.

Heymann, D., Perazzo, R. y Zimmermann, M. (2013). “Economía de fronteras abiertas: exploraciones en sistemas sociales complejos.”, 1a ed., *Teseo*, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Lighthill, M. J. y Whitham, G. B. (1955). "On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178), pp. 317-345.

Ortúzar, J. D. y Willumsen, L. G. (1994). "Modelling Transport." *Chichester: John Wiley and Sons*.