

DIAGRAMA FUNDAMENTAL PARA INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS Y UNA APLICACIÓN PARA SU COORDINACIÓN

Sebastián Muñoz V., Pontificia Universidad Católica de Chile (samunoz3@uc.cl)
Juan Carlos Herrera M., Pontificia Universidad Católica de Chile (jch@ing.puc.cl)

RESUMEN

Esta investigación presenta una metodología para el control semafórico de una intersección. Mediante un análisis espacio – temporal se estudia el efecto de distintas programaciones de semáforo en la acumulación de la intersección. Se analizan teóricamente los 3 regímenes del MFD: flujo libre, capacidad y congestión. En flujo libre, la proporción entre los verdes efectivos del ciclo y la acumulación presentan una relación cuadrática. En el régimen de capacidad y congestión, el diseño de las etapas no genera modificaciones en la acumulación global de la intersección. Además, en la rama de congestión los desfases con las intersecciones adyacentes se vuelven fundamentales.

Palabras clave: control semafórico, MFD, tráfico urbano.

ABSTRACT

This research presents a new methodology for the traffic control of signalized intersections. Through a spatio – temporal analysis the effect of different traffic lights schemes on the accumulation of the intersection is studied. The three regimes of the MFD are analyzed theoretically: free flow, capacity and congestion. At free flow, the ratio between the effective green times of the cycle and the accumulation exhibit a quadratic relationship. At the capacity and congestion regime, the design of stages does not generate modifications on the intersection accumulation. Moreover, at congestion the offsets with the adjacent intersections become fundamental.

Keywords: traffic light control, MFD, urban traffic.

1. INTRODUCCIÓN

La congestión en las grandes ciudades es un problema que ha ido en aumento. La construcción de nueva infraestructura vial no es una solución sustentable en el largo plazo debido a sus grandes costos de inversión y a la demanda inducida generada (Geroliminis y Daganzo, 2007). Es fundamental velar por una utilización eficiente de la oferta existente para así disminuir la congestión y mejorar la movilidad urbana (Geroliminis y Sun, 2011). Para lograr lo anterior, es necesario contar con herramientas que permitan monitorear fácilmente el estado del sistema para así implementar estrategia de control.

Para el monitoreo y análisis de una red, el Diagrama Fundamental Macroscópico (MFD por su sigla en inglés) surge como una interesante alternativa. El MFD nace con la idea de realizar control adaptativo para mejorar la movilidad urbana, en base a la acumulación vehicular en una zona (Daganzo, 2006). Este relaciona dos variables de tráfico conocidas como *outflow* y acumulación. La primera corresponde a la cantidad de vehículos que alcanzan sus destinos en la zona estudiada en cierta unidad de tiempo. Esto incluye los vehículos que terminan sus viajes y los que salen sector. La acumulación corresponde a la cantidad de autos presentes en el área estudiada excluyendo a los vehículos estacionados. El MFD presenta ventajas ya que permite captar el fenómeno de la congestión, las variables utilizadas están relacionadas con el *performance* del sistema y no son filtradas por ningún modelo previamente (Geroliminis y Daganzo, 2007).

A nivel de una intersección, usualmente se utilizan conteos vehiculares en los accesos para determinar el nivel de servicio ofrecido por determinada programación. En base a esa información se realizan ajustes en la programación. Sin embargo, muchas veces el conteo obtenido corresponde a un flujo observado y no el flujo demandado, el cual es clave para entender el nivel de servicio de la intersección.

Este trabajo propone el uso de un MFD para el monitoreo a nivel de una intersección, y de esa forma utilizar esa información para realizar ajustes en la programación. Así, el objetivo de esta investigación es utilizar el MFD para entender las dinámicas en una intersección semaforizada y así realizar control semafórico. Para esto se buscará una relación entre los parámetros que caracterizan las distintas programaciones de semáforo y los estados de tráfico presentes en la zona de estudio. De esta forma, es posible comprender como el largo de ciclo, proporciones de verde y desfases influyen en la cantidad de autos presentes en la intersección. Todo lo anterior con el fin mantener una óptima operación del semáforo, sobre todo cuando el flujo demandado de la intersección sobrepase su capacidad.

El artículo llevará a cabo un desarrollo teórico en base al modelo LWR (Lighthill y Whitham, 1955; Richards, 1956) para realizar un análisis espacio – temporal de los estados de tráfico presentes en la intersección que se generan debido a las distintas programaciones semafóricas. La sección 2 abordará la metodología utilizada definiendo la zona de estudio y sus características. Sección 3 describe las situaciones de tráfico analizadas en las que la intersección puede operar. Finalmente, en la sección 4 se realiza una discusión de los resultados encontrados, se plantean los pasos a seguir de esta investigación y los posibles trabajos futuros.

2. METODOLOGÍA

Para abordar el objetivo planteado en la sección anterior se realiza un desarrollo teórico mediante un análisis espacio temporal con el modelo LWR. Se analizan los estados de tráfico presentes en la intersección, los que se generan debido a las distintas programaciones de los semáforos. De esta forma se investiga la existencia de una relación entre la acumulación de vehículos en la intersección y algún indicador de operación del semáforo como el grado de saturación, la razón entre los verdes efectivos de los movimientos o desfases con intersecciones aguas abajo. Finalmente, al conocer cómo se alcanzan las distintas acumulaciones en una intersección es posible modificar el diseño de etapas para así mantener la operación cerca de la acumulación crítica para maximizar el *outflow*.

Es importante señalar que se priorizó utilizar el análisis espacio – temporal por sobre curvas acumuladas de llegadas y salidas, con el fin de determinar los estados de tráfico en la intersección. La principal razón es que el modelo LWR permite entender de mejor forma el fenómeno de propagación de la congestión y considera que las colas ocupan un lugar físico en el espacio. No obstante, el uso de este modelo requiere mayor información como la relación fundamental que rige en cada arco.

Para comprender las dinámicas que se producen en la intersección se analizan tres situaciones de tráfico en las que esta intersección puede operar:

- (i) Situación de flujo libre: corresponde a lo que ocurre cuando todos los vehículos que llegan en un ciclo pueden descargar en ese mismo ciclo, y existe tiempo de verde que no es usado. Esta situación es característica de las horas fuera de punta, y está representada por estados de tráfico donde al aumentar la acumulación también aumenta el *outflow* en la intersección.
- (ii) Situación de capacidad: corresponde a lo que ocurre cuando se observa cola aguas arriba de la intersección, pero la vía se encuentra despejada aguas abajo de la misma. Es decir, la intersección es el cuello de botella. En esta situación se observa la acumulación crítica (o un rango de ella) en la intersección que maximiza su *outflow*.
- (iii) Situación de congestión: corresponde a lo que ocurre cuando se observa cola tanto aguas arriba como aguas abajo de la intersección. Es decir, la descarga de la intersección se ve afectada por colas que se forman en intersecciones vecinas. Esta situación está representada por estados de tráfico donde al aumentar la acumulación disminuye el *outflow* de la intersección.

La intersección a analizar se muestra en la Figura 1a. La intersección consta de dos accesos unidireccionales con dos pistas cada uno de ellos. Se considera que cada acceso tiene el largo aproximado de una cuadra, es decir, 100 metros. Además, en las vías no circula transporte público con el fin de considerar vehículos con un mismo comportamiento. La zona analizada para determinar la acumulación y *outflow* de la intersección corresponde al cuadrado en la Figura 1a., el cual pasa por el punto medio de los arcos de acceso (posición x_0) y egreso (posición x_1). Esta zona se analizó en una ventana de tiempo correspondiente a un ciclo del semáforo.

Cada sentido de la intersección se analizará de forma separada. Para calcular la acumulación y el *outflow* se utilizarán las definiciones generalizadas de Edie (Edie, 1963), donde la ventana espacio temporal es de un ciclo en la zona estudiada de la intersección. En el caso de la acumulación se utiliza la densidad promedio, que corresponde al promedio ponderado de las densidades observadas en la ventana definida por sus respectivas áreas. Para transformar esta densidad a acumulación de vehículos simplemente hay que multiplicar por la cantidad de metros analizados. Dado que esto se realiza por sentido hay que multiplicar por el largo de la cuadra L . Finalmente, la acumulación promedio total de la intersección estará dada por la suma de las acumulaciones de cada sentido.

$$\text{Densidad Promedio}_{\text{sentido}} = \frac{\sum_i \text{Área}_{\text{Estado } i} * k_i}{C * L}, \quad i \in \{\text{Estados Observados en ventana } C * L\} \quad (1)$$

$$\text{Acumulación Promedio}_{\text{sentido}} = \text{Densidad Promedio}_{\text{sentido}} * L \quad (2)$$

$$\text{Acumulación Intersección} = \text{Acumulación Promedio}_{\text{norte-sur}} + \text{Acumulación Promedio}_{\text{oeste-este}} \quad (3)$$

En el caso de *outflow* se utiliza el flujo promedio de salida de la zona analizada, es decir, el flujo promedio observado 50 metros aguas abajo de la intersección en un ciclo (posición x_1). El *outflow* promedio total de la intersección estará dado por la suma de los flujos de salida de cada sentido.

$$\text{Outflow Promedio}_{\text{sentido}} = \frac{\sum_i \text{tiempo}_{\text{Estado } i} * q_i}{C}, \quad i \in \{\text{Estados Observados en } x_1 \text{ en un ciclo}\} \quad (4)$$

$$\text{Outflow Intersección} = \text{Outflow Promedio}_{\text{norte-sur}} + \text{Outflow}_{\text{oeste-este}} \quad (5)$$

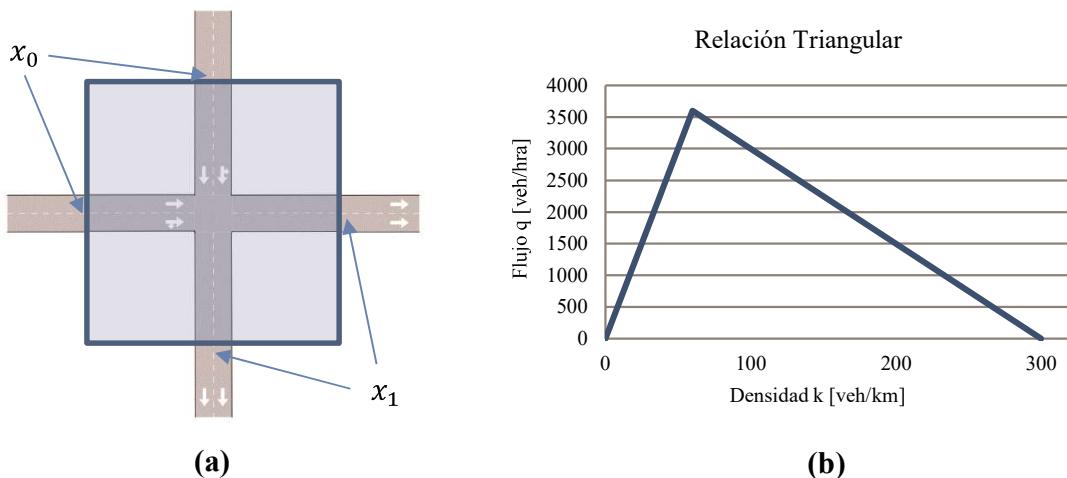


Figura 1. (a) Intersección considerada para la modelación y respectiva área a analizar.; (b) Relación fundamental triangular considerada para los arcos de la intersección.

Se asume que la relación triangular que se muestra en la Figura 1b. rige en cada rama de la intersección. Matemáticamente esta relación es de la siguiente forma:

$$q(k) = \begin{cases} 60 * k & \text{Si } k \leq 60 \\ -15 * (k - 300) & \text{Si } 60 < k \leq 300 \end{cases} \quad (6)$$

Así, se asume que la velocidad a flujo libre es 60 kilómetros por hora (velocidad máxima permitida en una vía urbana aproximadamente), la capacidad es 3.600 vehículos por hora (por tener dos pistas) y la densidad de taco es 300 vehículos por kilómetro (asumiendo largo promedio de 5 metros y una separación de 1 metro aproximadamente entre vehículos consecutivos).

Las programaciones de semáforo asumen que el entre verde es de 4 segundos, compuesto por 3 segundos de amarillo y 1 de rojo - rojo. En este análisis se considerará un largo de ciclo de 60 segundos. Al tener solamente dos etapas se tiene que la pérdida por ciclo es de 8 segundos. El diseño de etapas corresponde a la definición de la duración de los tiempos de verde y entre verdes para cada sentido.

La intersección se analizará en las tres situaciones de tráfico que puede operar, para ello definimos los siguientes estados de tráfico de la relación fundamental. Estos nos permite identificar los estados presentes dadas las distintas programaciones de semáforo.

Tabla 1. Estados de tráfico provenientes del diagrama fundamental de los arcos de la intersección, los cuales se analizarán en las secciones siguientes.

Estado i	Flujo q_i [veh/hra]	Densidad k_i [veh/km]	Color
Estado 0	0	0	Verde
Estado A	600 ó 800	10 ó 13.3	Amarillo
Estado C	3600	60	Naranja
Estado B	0	300	Rojo

Para analizar todas las situaciones se utilizó un software de cálculo matemático llamado Maple. Es importante señalar que cada sentido de la intersección se trató de manera independiente y luego se analizó el impacto conjunto de estos en la acumulación de la intersección.

3. ANÁLISIS DE CASOS

3.1 Flujo Libre

Esta situación está representada por niveles de demanda bajos respecto a la capacidad de la intersección (3600 vehículos por hora por sentido aproximadamente). Sin pérdida de generalidad, se consideró una demanda de 800 vehículos por hora para el acceso norte y una demanda de 600 vehículos por hora para el acceso oeste de la intersección. Es situación se caracteriza por la ausencia de colas remanentes entre ciclos semafóricos. Esto quiere decir que la cola máxima alcanzada en cada sentido durante el ciclo es completamente disipada en el tiempo de verde.

En la Figura 2 se aprecia el análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de esta situación. La posición x_0 y x_1 representa el punto de observación a mitad de cuadra aguas arriba y abajo de la intersección, respectivamente (es decir ± 50 metros). El punto Int representa la posición física de la intersección. Es decir, se asume que la intersección no tiene un largo físico ya que, en teoría, los vehículos no pueden detenerse en esa zona. Realizando análisis geométrico es posible

determinar el largo máximo de cola, el tiempo de disipación de esta y el verde efectivo mínimo necesario para que el último vehículo en cola alcance a cruzar la intersección.

La onda de choque con velocidad u_{ab} se produce por el cambio de estado entre el flujo que llega a la intersección (Estado A) y el estado de tráfico por estar la luz roja del semáforo (Estado B). Esta velocidad se puede determinar fácilmente, ya que de acuerdo al modelo LWR, la velocidad de la onda de choque entre dos estados a y b viene dada por la siguiente expresión:

$$u_{ab} = \frac{q_a - q_b}{k_a - k_b} \quad (7)$$

La onda vf y w corresponden a la velocidad de flujo libre y congestión respectivamente, asumidas en la relación triangular del arco. El tiempo t_R corresponde a la duración del rojo del semáforo para dicho sentido.

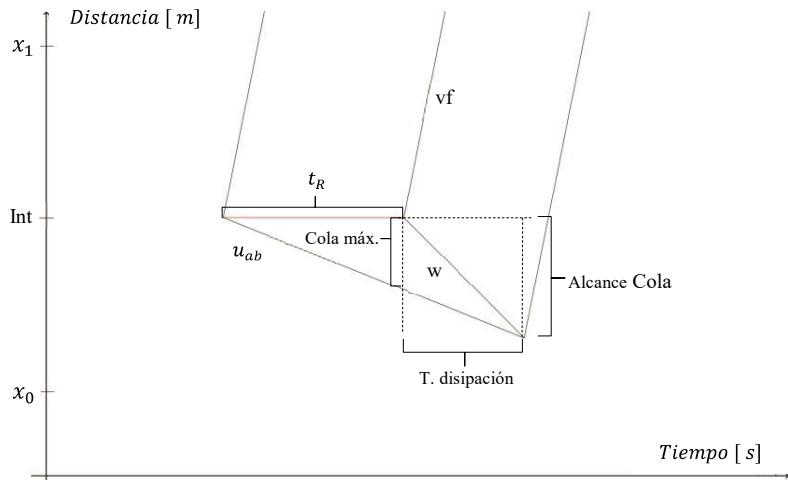


Figura 2. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (i) en un solo sentido de la intersección.

El largo de cola máxima, tiempo de disipación de la cola, alcance de la cola y tiempo mínimo para que el último vehículo de la cola alcance a pasar la intersección vienen dados por las siguientes expresiones:

$$Cola \max = |u_{ab}| * t_R \quad (8)$$

$$t_{disipación} = \left| \frac{L_{max}}{w - u_{ab}} \right| \quad (9)$$

$$Alcance \ Cola = |t_{disipación} * w| \quad (10)$$

$$t_{min \ último \ veh} = \frac{Alcance \ Cola}{vf} \quad (11)$$

Es importante destacar que esta situación se mantendrá mientras no exista cola remanente entre ciclos del semáforo para ambos sentidos. Para ello se debe cumplir que la cola se tiene que disipar y el último vehículo en llegar a ésta debe alcanzar a cruzar la intersección en el verde asignado a ese sentido. En las situaciones analizadas se procuró cumplir esta relación para los verdes efectivos de cada sentido.

$$t_{disipación} + t_{min \text{ último veh}} \leq Vef \quad (12)$$

En la Figura 3 se aprecia el análisis simultáneo de ambos sentidos, donde es posible observar los distintos estados de tráfico presentes en la intersección en la situación a flujo libre durante un ciclo. El área representa la ventana espacio temporal utilizada para el análisis (un ciclo del semáforo en la zona definida en la Figura 1a.).

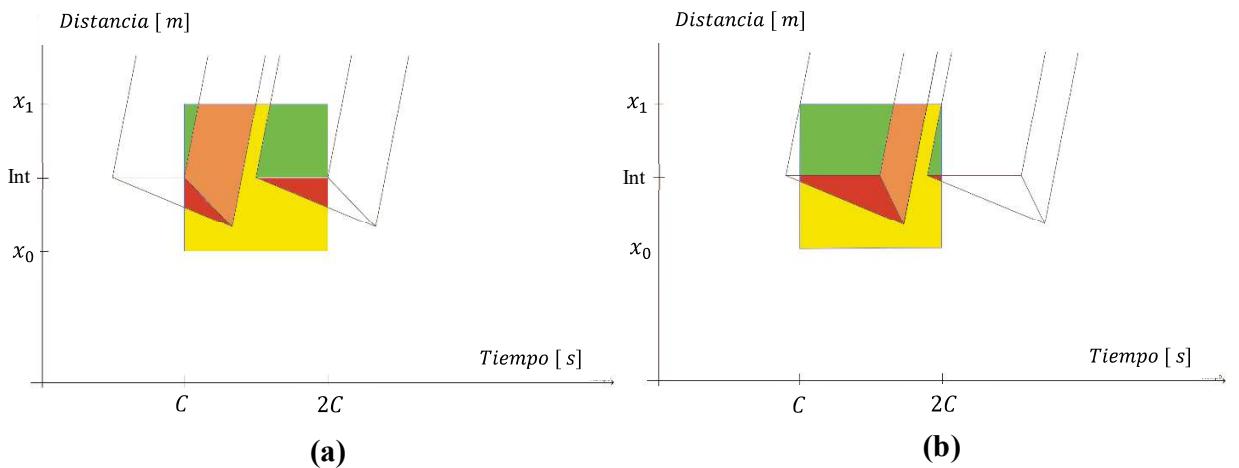


Figura 3. (a) Representa los estados de tráfico presentes en la intersección en el sentido norte- sur durante un ciclo.; (b) Representa los estados de tráfico presentes en la intersección en el sentido oeste- este durante un ciclo.

Es interesante notar que las áreas coinciden con figuras geométricas fáciles de calcular. Para cada acceso, las áreas de cada estado se calculan de la siguiente forma, donde C corresponde al largo del ciclo semafórico y L al largo de la cuadra considerada (en este caso 100 metros).

$$\text{Área}_{estad o 0} = t_R * \frac{L}{2} \quad (13)$$

$$\text{Área}_{estad o B} = \frac{t_R * \text{Alcance Cola}}{2} \quad (14)$$

$$\text{Área}_{estad o C} = \frac{(t_{disipación} + t_{min \text{ último veh}}) * \text{Alcance Cola}}{2} + (t_{disipación} + t_{min \text{ último veh}}) * \frac{L}{2} \quad (15)$$

$$\text{Área}_{estad o A} = C * L - (\text{Área}_{estad o 0} + \text{Área}_{estad o B} + \text{Área}_{estad o C}) \quad (16)$$

La densidad promedio por sentido en este caso se calcula según la ecuación 17 y la acumulación según la ecuación 3 descrita anteriormente.

$$\text{Densidad Promedio}_{\text{sentido}} = \text{Área}_{\text{estado 0}} * k_0 + \text{Área}_{\text{estado A}} * k_A + \text{Área}_{\text{estado B}} * k_b + \text{Área}_{\text{estado C}} * k_c \quad (17)$$

Una vez definido esto se probaron distintas programaciones de semáforo para ver cómo afectaban en la acumulación promedio en un ciclo en la intersección. Se busca relacionar un indicador de la operación del semáforo con la acumulación en la intersección, la cual a su vez está relacionada con su *outflow*. En base a esto, se decidió graficar la proporción entre los verdes efectivos del semáforo y la acumulación obtenida. Así se obtuvo una relación única por cada largo de ciclo probado cómo es posible ver en la Figura 4. Cada punto representa la acumulación promedio en un ciclo de la intersección obtenida para un diseño de etapas específico dado por la proporción de los verdes efectivo ($\lambda_i = V_{efi}/C$). De esta resulta intuitivo cómo mover la programación semafórica para obtener la acumulación deseada.

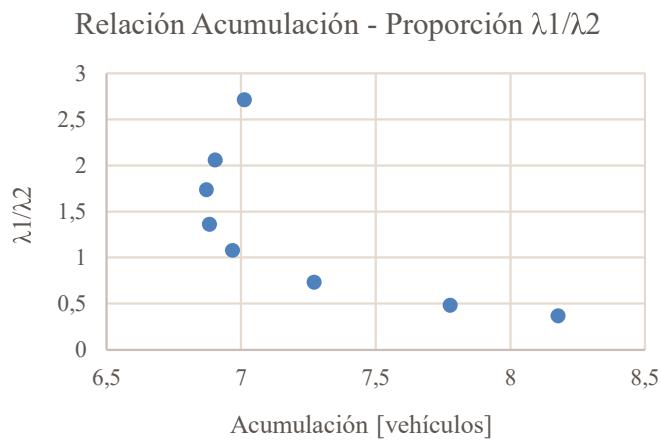


Figura 4. Relación encontrada entre la acumulación de la intersección y la proporción entre verdes efectivos de las etapas del semáforo, para un ciclo de 60 segundos.

3.2 Capacidad

Esta situación está representada por niveles de demanda que exceden la capacidad de la intersección (3600 vehículos por hora por sentido aproximadamente) y por condiciones de flujo libre aguas abajo de ella. Esta situación se caracteriza porque se observa cola aguas arriba de la intersección, pero la vía se encuentra despejada aguas abajo de la misma. Es decir, la intersección es el cuello de botella. Esta situación se produce porque existen colas remanentes entre ciclos semafóricos. Al cabo de algunos ciclos se supera el periodo de transición y aguas arriba de la intersección se observará solo estado B o C y se repetirá dicho patrón tal como se observa en la Figura 5.

En la Figura 5 se aprecia el análisis simultáneo de ambos sentidos, donde es posible observar los distintos estados de tráfico presentes en la intersección. El área representa la ventana de espacio temporal (un ciclo del semáforo en la zona definida en la Figura 1a.).

Al igual que en la situación anterior las áreas coinciden con figuras geométricas fáciles de calcular. Para cada acceso, las áreas de cada estado se calculan de la siguiente forma,

$$\text{Área}_{\text{estado } 0} = t_R * \frac{L}{2} \quad (18)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } B} = t_R * \frac{L}{2} \quad (19)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } C} = C * L - (\text{Área}_{\text{estado } 0} + \text{Área}_{\text{estado } B}) \quad (20)$$

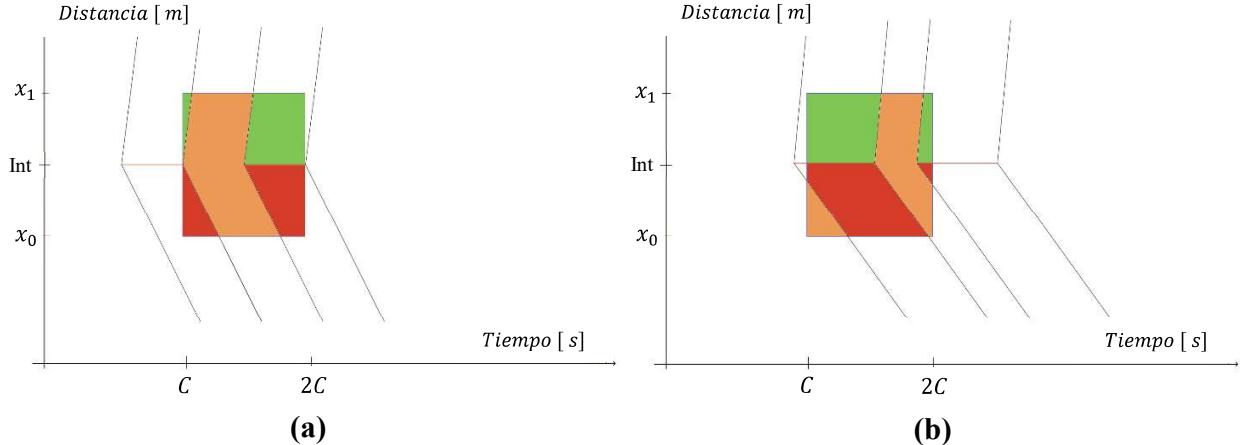


Figura 5. (a) Representa los estados de tráfico presentes en la intersección en el sentido norte- sur durante un ciclo.;
 (b) Representa los estados de tráfico presentes en la intersección en el sentido oeste- este durante un ciclo.

Utilizando las definiciones generalizadas (Edie, 1963), la densidad promedio por sentido en este caso se calcula según la ecuación 21 y la acumulación según la ecuación 3 descrita anteriormente.

$$\text{Densidad Promedio}_{\text{sentido}} = \text{Área}_{\text{estado } 0} * k_0 + \text{Área}_{\text{estado } B} * k_b + \text{Área}_{\text{estado } C} * k_c \quad (21)$$

En este caso al probar distintos diseños de etapa para un mismo ciclo no se producen cambios en la acumulación promedio de la intersección. Esto se explica porque al producir cambios en el verde de un sentido se ve compensando con el otro sentido, dado que en este ejercicio se mantiene el ciclo constante. Por lo tanto, las acumulaciones por sentido varían, pero el efecto se balancea produciendo la misma acumulación promedio en la zona de análisis tal como se aprecia en la Figura 6. La acumulación crítica es cercana a los 22 vehículos para la intersección estudiada.

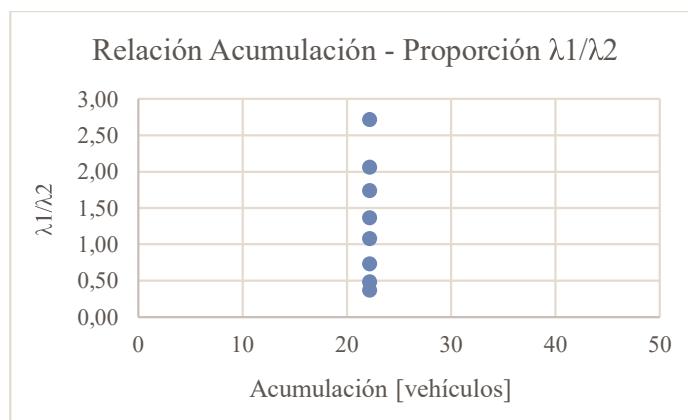


Figura 6. Relación encontrada entre la acumulación de la intersección y la proporción entre verdes efectivos de las etapas del semáforo, para un ciclo de 60 segundos.

3.3 Congestión

Al igual que en el caso anterior, esta situación está representada por niveles de demanda superiores a la capacidad de la intersección (3600 vehículos por hora por sentido aproximadamente). La diferencia es que en esta situación la condición aguas abajo de la intersección no es de flujo libre sino que de congestión. Así, la intersección bajo análisis no se encuentra operando a capacidad, sino que su operación está determinada por la capacidad de intersecciones vecinas.

Esta situación se caracteriza porque existen colas remanentes entre ciclos semafóricos. Además, la operación se ve afectada por las colas remanentes de semáforos aguas abajo de la intersección. Por eso toma una importancia fundamental el desfase con las intersecciones adyacentes de la estudiada. Al igual que el caso anterior se asume que ya pasó el periodo de transición, por lo tanto el comportamiento se replicará cada ciclo. En este escenario se analizarán como afectan los desfases de las intersecciones vecinas, donde éste se define como el tiempo que transcurre desde que se enciende la luz verde en la intersección aguas abajo hasta que se enciende la luz verde (para el mismo movimiento) en la intersección analizada. Para todos los desarrollos presentados a continuación se asume que las programaciones de los semáforos de las intersecciones adyacentes son iguales a aquellas de la intersección estudiada, al igual que en estudios analíticos del MFD (Daganzo & Geroliminis, 2008). Se utilizará también el mismo desfase para ambos sentidos. El desfase δ entre las intersecciones puede moverse en el siguiente rango de valores,

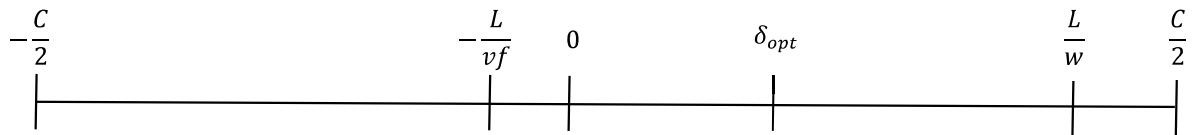


Figura 7. Rango de valores en los que se puede mover el desfase de la intersección analizada.

3.3.1 Desfase $\delta \in \left[-\frac{L}{vf} ; \frac{L}{w} \right]$

En este caso se tiene que $\delta \in \left[-\frac{L}{vf} ; \frac{L}{w} \right]$, lo que implica que la cola remanente en la intersección aguas abajo tiene un efecto en la zona estudiada. En la Figura 8 se aprecia el análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de esta situación. Las ondas de choque que caracterizan esta situación tienen velocidades vf y w . Si no se produce ningún cambio en la demanda, en los desfases o en la capacidad de las intersecciones aguas abajo, el patrón mostrado en la Figura 8 se repetirá continuamente. La posición x_0 y x_1 representan el punto de observación a mitad de cuadra aguas arriba y abajo de la intersección respectivamente (es decir ± 50 metros). El punto Int 1 e Int 2 representan la posición física de la intersección analizada y la aguas abajo respectivamente

Como se observa en la Figura 8, la cola ocupa un espacio de $L-x$ unidades de distancia aguas arriba de la intersección 2. Resolviendo geométricamente, el largo x viene determinado por la siguiente expresión,

$$x = \frac{vf * (L - \delta * w)}{vf + w} \quad (22)$$

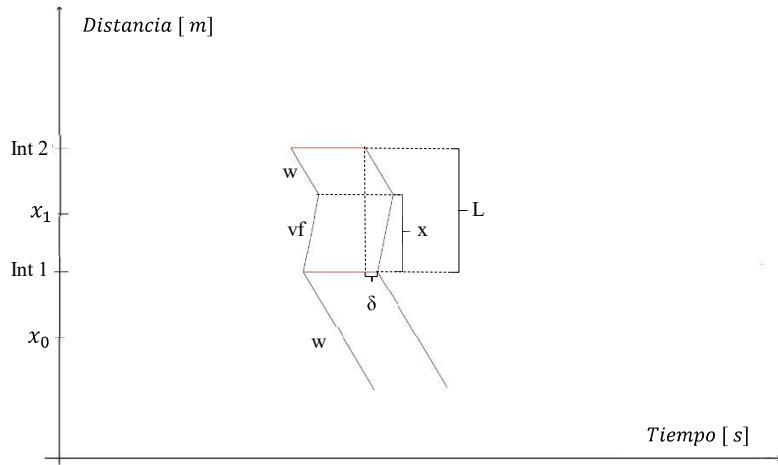


Figura 8. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (iii) en un solo sentido de la intersección.

Si $x \geq \frac{L}{2}$ entonces en la zona entre la intersección 1 y $\frac{L}{2}$ aguas abajo solo se observará el estado 0 o C. En caso contrario se observará estado 0, estado B o estado C. Por lo tanto, si despejamos de la ecuación 22 el desfase necesario para que $x = L/2$ corresponde a,

$$\delta_{opt} = \frac{L * (vf - w)}{2 * vf * w} \quad (23)$$

En la Figura 9 se aprecia el análisis simultáneo de ambos accesos, donde es posible observar los distintos estados de tráfico presentes en la intersección. El área representa la ventana de espacio temporal (un ciclo del semáforo en la zona definida en la Figura 1a.). Para simplificar solo se mostrará el caso en que $x \geq \frac{L}{2}$.

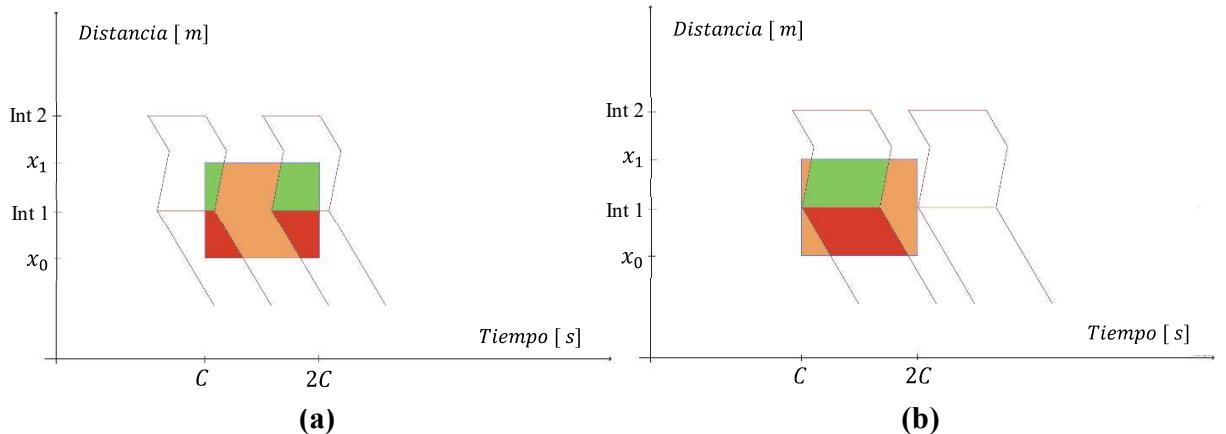


Figura 9. (a) Representa los estados de tráfico presentes en la intersección en el sentido norte- sur durante un ciclo.; (b) Representa los estados de tráfico presentes en la intersección en el sentido oeste- este durante un ciclo.

Al igual que en la situación anterior las áreas coinciden con figuras geométricas fáciles de calcular. Las áreas de cada estado se calculan de la siguiente forma dependiendo del largo de x,

$$\text{Área}_{\text{estado } 0} = \begin{cases} t_R * x & \text{Si } x \leq \frac{L}{2} \\ t_R * \frac{L}{2} & \text{Si } \frac{L}{2} < x \end{cases} \quad (24)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } B} = \begin{cases} t_R * \left(\frac{L}{2} - x\right) + t_R * \frac{L}{2} & \text{Si } x \leq \frac{L}{2} \\ t_R * \frac{L}{2} & \text{Si } \frac{L}{2} < x \end{cases} \quad (25)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } C} = C * L - (\text{Área}_{\text{estado } B} + \text{Área}_{\text{estado } 0}) \quad (26)$$

Utilizando las definiciones generalizadas (Edie, 1963), la densidad promedio por sentido en este caso se calcula según la ecuación 26 y la acumulación según la ecuación 3 descrita anteriormente.

$$\text{Densidad Promedio}_{\text{sentido}} = \text{Área}_{\text{estado } 0} * k_0 + \text{Área}_{\text{estado } B} * k_b + \text{Área}_{\text{estado } C} * k_c \quad (27)$$

Al igual que la situación explicada en el apartado 3.2 al probar distintos diseños de etapa para un mismo ciclo no se aprecian cambios en la acumulación promedio. Esta solo se verá afectada por un cambio en la demanda o por cambios en los desfases señalados.

Un caso particular ocurre cuando el desfase es igual a $\delta = \frac{L}{w}$. En la Figura 10 se aprecia el análisis espacio temporal mediante LWR de esta situación. La onda de choque que caracteriza esta situación es w .

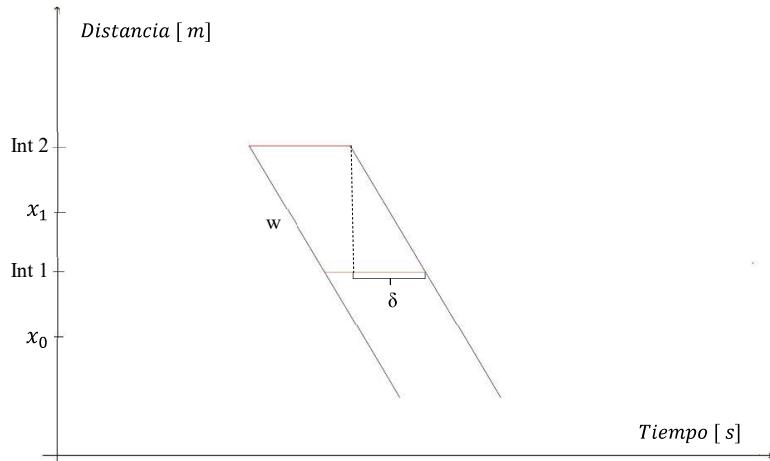


Figura 10. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (iii) en un solo sentido de la intersección cuando $\delta = \frac{L}{w}$.

En la Figura 11 se aprecia el análisis simultáneo de ambos sentidos, donde es posible observar los distintos estados de tráfico presentes en la intersección en la situación a flujo libre durante un ciclo. El área representa la ventana de espacio temporal (un ciclo del semáforo en la zona definida en la Figura 1a.).

Las áreas de cada estado se calculan de la siguiente forma,

$$\text{Área}_{\text{estado } B} = t_R * L \quad (28)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } C} = C * L - \text{Área}_{\text{estado } B} \quad (29)$$

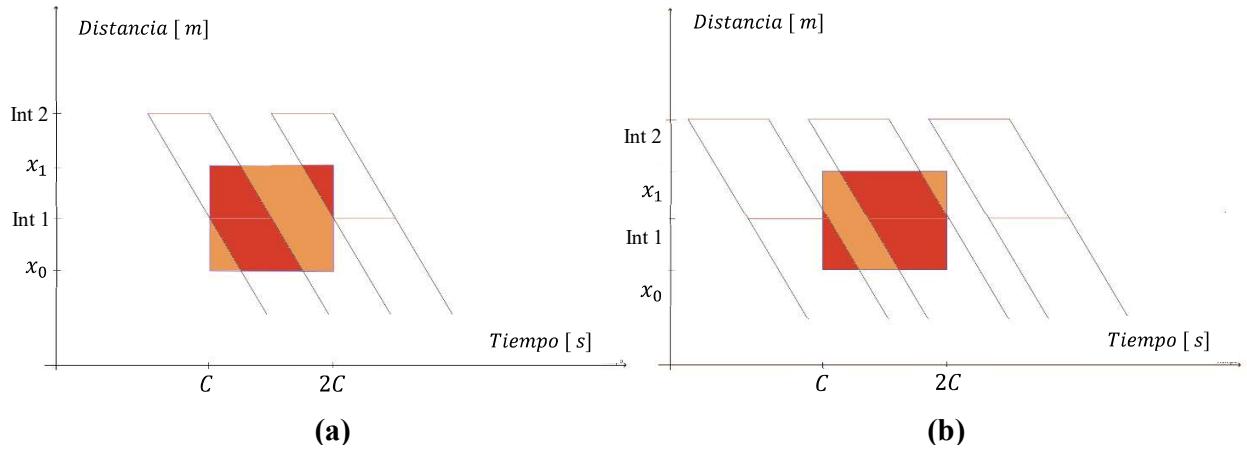


Figura 11. (a) Representa los estados de tráfico presentes en la intersección en el sentido norte- sur durante un ciclo.;
 (b) Representa los estados de tráfico presentes en la intersección en el sentido oeste- este durante un ciclo.

Utilizando las definiciones generalizadas (Edie, 1963), la densidad promedio por sentido en este caso se calcula según la ecuación 29 y la acumulación según la ecuación 3 descrita anteriormente.

$$\text{Densidad Promedio}_{\text{sentido}} = \text{Área}_{\text{estado B}} * k_b + \text{Área}_{\text{estado C}} * k_c \quad (30)$$

Al igual que la situación explicada en el apartado 3.2 al probar distintos diseños de etapa para un mismo ciclo no se aprecian cambios en la acumulación promedio. Esta solo se verá afectada por un cambio en la demanda o por cambios en los desfases señalados.

Otro caso particular ocurre cuando el desfase es igual a $\delta = -\frac{L}{v_f}$, lo que implica que el último vehículo que cruza la intersección 1 también alcanza a cruzar la intersección 2. En la Figura 12 se aprecia el análisis espacio temporal mediante LWR de esta situación. Si no se produce ningún cambio en la demanda o en los desfases, el patrón mostrado en la se Figura 12 repetirá continuamente.

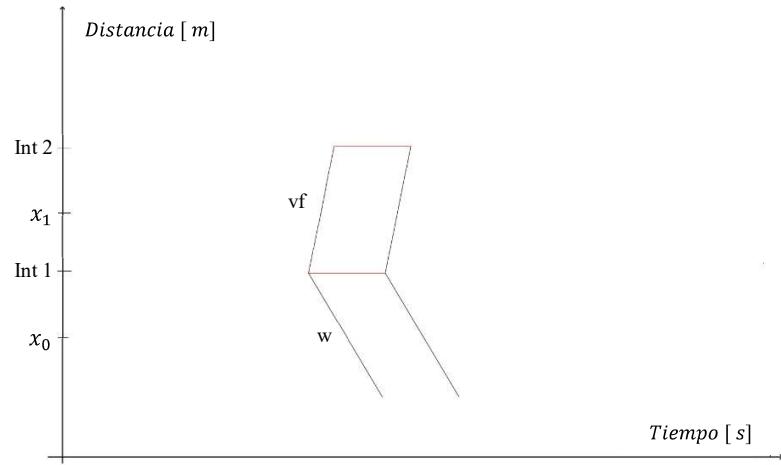


Figura 12. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación en un solo sentido de la intersección.

Es posible notar que esta situación no pertenece al caso de congestión, ya que coincide con la modelada en el apartado 3.2. De esta forma es posible ver que la situación de congestión converge

a la situación de capacidad si el desfase se mueve entre $\delta \in \left[-\frac{L}{vf} ; \delta_{opt} \right]$. Por lo tanto, las áreas y acumulación promedio en la intersección se calculan de la misma forma.

En la Figura 13 se observa cómo se modifica la acumulación de la intersección a medida que se mueve el desfase entre $\delta \in \left[-\frac{L}{vf} ; \frac{L}{w} \right]$ para la intersección analizada.

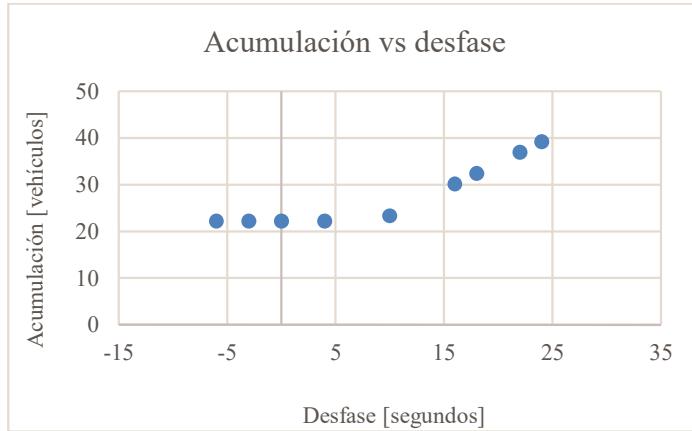


Figura 13. Relación encontrada entre la acumulación de la intersección y el desfase con las intersecciones adyacentes para un ciclo de 60 segundos.

3.3.2 Desfase $\delta \in \left(-\frac{c}{2} ; -\frac{L}{vf} \right) \cup \left(\frac{L}{w} ; \frac{c}{2} \right)$

En estas situaciones el comportamiento es inestable entre ciclos y depende mucho de las velocidades de las ondas de choque vf y w . Es por esto que no es posible llegar a estado de régimen que se repita constantemente entre ciclos y que pueda ser generalizado para el control semafórico en tiempo real. Es importante en una investigación futura estudiar si existe algún comportamiento identificable entre estos desfases y la acumulación de la intersección.

4. DISCUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha estudiado como diferentes programaciones de semáforo y niveles de demanda en una intersección producen distintos estados de tráfico. Mediante el modelo LWR es posible identificar la acumulación que se tendría en el área de estudio dado una configuración del semáforo. Se analizaron tres situaciones que permiten caracterizar los regímenes del MFD: flujo libre, capacidad y congestión. Las conclusiones obtenidas generan bastante optimismo para poder realizar control semafórico. Esto ya que muestran cómo deben ajustarse las programaciones del semáforo y los respectivos desfases para obtener la acumulación deseada en la intersección analizada sobre todo cuando existe congestión.

En la rama de flujo libre, la proporción entre los verdes efectivos del ciclo toma preponderancia en el análisis. Además, es posible apreciar que existe una relación cuadrática entre esta proporción y la acumulación de la zona para el caso estudiado. Por otro lado, en el régimen de capacidad y congestión del MFD, el diseño de las etapas no genera modificaciones en la acumulación global de

la intersección. Esto se produce porque los cambios se producen en las acumulaciones por sentido (al tener distinto verde efectivo), pero en la intersección total no se observan cambios. Además, en la rama de congestión los desfases con las intersecciones adyacentes se vuelven fundamentales.

La metodología presentada asume que la llegada de vehículos a la intersección es constante y determinística. Por lo tanto, no aborda los efectos estocásticos que se producen en la vida real. Es por esto que el siguiente paso de la investigación es validarla mediante simulación. Para ello se utilizará el *software* de simulación microscópica de tráfico llamado AIMSUN. Esto permitirá evaluar distintos escenarios que incorporen el efecto aleatorio en las llegadas. Luego, se analizará las ventajas de la metodología mediante los cambios en los tiempos de espera, consumos de combustible, número de paradas y colas en la intersección.

Como futuras líneas de investigación se propone estudiar distintas programaciones semafóricas entre las intersecciones adyacentes a la estudiada. En este trabajo se asume que las intersecciones aguas abajo poseen los mismos diseños de etapas. Además, se podría investigar el efecto de los desfases explicados en el apartado 3.3.2 sobre la acumulación de la intersección. Esto podría realizarse mediante simulación puesto que, no se observa un comportamiento estacionario que permita analizarlos mediante el modelo LWR.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo otorgado por CONICYT a través del proyecto FONDECYT #1160943.

REFERENCIAS

- Edie L. C. (1963) Traffic stream measurements and definitions. **Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow**, London, pp. 139-154.
- Daganzo, C. F. (2006). Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. **Transportation Research Part B: Methodological**, 41(1), 49–62.
- Daganzo, C. F., & Geroliminis, N. (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. **Transportation Research Part B: Methodological**, 42(9), 771–781.
- Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2007). Macroscopic modeling of traffic in cities. **TRB 86th Annual Meeting**, (January), 7–413.
- Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. **Transportation Research Part B: Methodological**, 42(9), 759–770.
- Geroliminis, N., Haddad, J., & Ramezani, M. (2012). Optimal Perimeter Control for Two Urban Regions With Macroscopic Fundamental Diagrams : A Model Predictive Approach, **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 14(1), 1–12.
- Geroliminis, N., & Sun, J. (2011). Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. **Transportation Research Part B: Methodological**, 45(3), 605–617.
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955, May). On kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads. In **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences** (Vol. 229, No. 1178, pp. 317-345). The Royal Society.
- Richards, P. I. (1956). Shock waves on the highway. **Operations research**, 4(1), 42-51.