

# La problemática del tránsito urbano. Un enfoque basado en sistemas de ecuaciones.

Yair Yaryez<sup>1</sup>, María Mercedes Gaitán<sup>1</sup> y Gustavo de Dios Pita<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná, Entre Ríos, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 21/09/2018

Fecha de aceptación del manuscrito: 12/12/2018

Fecha de publicación: 26/12/2018

**Resumen**— Para los integrantes del Grupo de Investigación de la Enseñanza de la Matemática en Carreras de Ingeniería (GIEMCI) de la Facultad Regional Paraná de la Universidad Tecnológica Nacional es una preocupación constante el desarrollo de competencias que debe lograr un estudiante de ingeniería, lo que nos lleva a revisar nuestras prácticas docentes.

Como en los últimos años el estudiante ha cambiado su actitud frente al conocimiento y la información, es tarea del educador adoptar un nuevo punto de vista sobre la disciplina, dándole preponderancia a situaciones que puedan tener una implementación real.

En este caso presentamos un contenido clásico de Álgebra Lineal en una aplicación en Ingeniería Civil y Transporte. Exponemos un modelo de solución para una problemática habitual como lo es la de la circulación de distintos medios de transporte en las calles de una ciudad. En el procedimiento proponemos una forma de reorganizar el tránsito vehicular en situaciones de interrupción del mismo mediante el empleo de Sistemas de Ecuaciones Lineales, sin llevar al colapso las vías alternativas.

**Palabras clave**— Ingeniería Civil, tránsito vehicular urbano, sistemas de ecuaciones lineales.

**Abstract**—The members of the Mathematics Teaching in Engineering Research Group from the Paraná Regional School of Engineering at Universidad Tecnológica Nacional find the development of competencies in engineering students a permanent challenge that leads to the revision of their own teaching practices to maximize student learning.

In the last years, there has been a change in students in terms of their attitude towards knowledge and information and it is the educator's task to find new ways to deal with the content of the subject they teach, making an emphasis on the contextualization of topics in life-like situations.

The present communication introduces the development of a Linear Algebra content applied to Transport and Civil Engineering. We propose a solution model for public transport circulation in a city. Linear Equation Systems are used to reorganize traffic by means of interruption situations without resulting in the collapse of alternative routes.

**Keywords**— Civil Engineering, urban vehicular traffic, linear equations.

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Paraná, capital de la provincia de Entre Ríos, es una ciudad que fue formándose lentamente a partir de las condiciones propicias para la población. Carente de acta fundacional y erigida sobre las barrancas que bordean el caudaloso río Paraná, no hubo definición previa del

terreno para su trazado, lo que está reflejado en el entramado de sus calles y las características de las mismas.

Muchas calles no fueron planificadas y surgieron, por ejemplo, a partir de la necesidad de transportar la mercadería desde el puerto hasta la estación de ferrocarril, lo que queda indicado por el ancho de algunas calles, los encuentros entre las mismas, la falta de continuidad y rectitud.

Además, debido a sus distintos niveles, hay arrastre de material de la base del pavimento, lo que genera oquedades, baches y obstrucciones sorpresivas. Esto requiere de un

Dirección de contacto:

María Mercedes Gaitán, Santa Fe 410, (3100) Paraná, Entre Ríos, Tel. 0343 4310756, merorsi@gmail.com1

constante mantenimiento del asfalto y surge así la necesidad de organizar el tránsito mediante el estudio de su caudal y las capacidades de las calles.

## OBJETIVO

Como una manera de dotar al estudiante de competencias ingenieriles, empleando contenidos desarrollados en Álgebra Lineal en una situación real, ilustramos un método para reorganizar el tránsito en situaciones inesperadas, tales como accidentes de tránsito, baches que disminuyen la capacidad de un tramo de la calle, manifestaciones inesperadas; o bien, en situaciones premeditadas como puede ser el mantenimiento de la señalización horizontal de las calles o reparaciones de un tramo, entre otras.

## MÉTODOS

El procedimiento consistió en estudiar el tránsito en una zona de la ciudad de Paraná en la cual deseamos calcular el caudal de vehículos en la franja horaria pico (de 11:00 am a 1:00 pm), discriminando los usuarios de estas calles por tipo de vehículo, como se mostrará más adelante.

La zona seleccionada es una región comprendida por las calles Leandro N. Alem, 9 de julio, Gral. Justo J. Urquiza y Arturo Illia, incluyendo partes de las calles 25 de mayo y Gral. Manuel Belgrano. Se la eligió debido a que es un sector primordial de la ciudad de Paraná, con calles que resultan conflictivas por sus niveles de tránsito ya que son utilizadas generalmente para el ingreso o salida del centro de la ciudad.



Fig. 1: Ciudad de Paraná, sector céntrico

Realizamos un relevamiento de las características de las calles y determinamos la capacidad y los caudales que soporta cada una para sus diferentes niveles de tránsito, características necesarias para la obtención de una información confiable como fuente a utilizar.

Empleando un tema clásico de Álgebra Lineal, como Sistemas de Ecuaciones Lineales, se confeccionó un modelo para proponer una solución a situaciones particulares de tránsito, tales como redireccionamiento del mismo para evitar embotellamientos (en caso de cortes de calles) evitando el colapso de las vías alternativas, como así también la determinación de horarios en los que sería

posible la reducción de la calzada para realizar tareas de mantenimiento.

## ESTUDIO DEL TRÁNSITO

Una medida de la eficiencia con la que una vía presta servicio es su capacidad, que no solo tiene que ver con las dimensiones de la calle o carretera, sino también con la calidad del servicio.

La capacidad  $q_{m\acute{a}x}$  se define como la tasa máxima de flujo que puede soportar una calle, o bien, en otras palabras, la mayor cantidad de vehículos que pueden pasar por un punto en un intervalo de tiempo dado [2]. Se toma para este estudio un lapso de 15 minutos, ya que se considera que es el mínimo período de tiempo en el que se puede presentar un intervalo estable de tránsito.

Hay que tener presente el carácter probabilístico de la capacidad, por lo que puede ser mayor o menor en un instante dado. A su vez, la capacidad se define para condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, factores que, alterados, provocan variación en el tránsito.

Dichas condiciones prevalecientes se agrupan en tres tipos generales, a saber:

Condiciones de infraestructura vial: son las características físicas y geométricas de la carretera, y el desarrollo del entorno de la misma.

Condiciones del tránsito: referidas a la distribución del tránsito en tiempo y en espacio; y su composición en tipos de vehículos, como pueden ser: livianos, ómnibus, camiones y motos.

Condiciones de control: referidas a los dispositivos para controlar el tránsito, como señales y semáforos [3].

Para medir la calidad del flujo vehicular existe el concepto de nivel de servicio, que es una medida cuantitativa que describe las condiciones del flujo vehicular, y de su percepción por los conductores y/o pasajeros.

Como lo reproduce Cal y Mayor [3], el Manual de Capacidad Vial de 1985 [2] establece seis niveles de servicio, denominados: A, B, C, D, E y F, que van del menos al más congestionado y presenta cada uno sus características particulares.

El nivel A representa una circulación a flujo libre, mientras el nivel F representa las condiciones de flujo forzado, esto sucede cuando la cantidad de tránsito que se acerca a un punto excede el caudal que puede soportar y se generan colas o embotellamientos.

Los factores físicos pueden ser medidos en horarios convenientes, no así los factores internos, que deben ser medidos en los horarios de máxima demanda.

En función del nivel de servicio está dada la cantidad máxima de vehículos que pueden circular por una vía, el cual se denomina flujo de servicio. En este estudio consideramos hasta el nivel E, dado que luego de este no se registran aumentos del caudal, sino que por el contrario disminuye.

Para determinar el nivel de servicio se deben comparar los factores de flujo y capacidad ( $v/c$ ).

Debido a las condiciones de las calles estudiadas se ha considerado para este estudio una capacidad por carril de 2000 vehículos/hora [ $vph$ ].

El análisis que generalmente se realiza sirve para determinar factores externos e internos de ciertos tramos de calle en el flujo de servicio para el nivel dado. Se han fijado valores numéricos que permiten estimar estos factores en forma empírica, y que sirven para calcular en forma cuantitativa la capacidad de la vía.

### MÉTODO DE CÁLCULO

Según Cal y Mayor [3], la expresión básica para el cálculo del flujo de servicio es:

$$FS = c_j * \left(\frac{v}{c}\right) * (N) * (f_a) * (f_{VP}) * (f_c)$$

siendo:

$FS$ : factor de servicio bajo condiciones del camino y tránsito mixto por hora ( $vph$ ).

$c_j$ : capacidad de carril en condiciones ideales para velocidad de proyecto (2000  $vph/carril$ ).

$v/c$ : máxima relación volumen-capacidad, que se calculan en las Tablas 14 a 19 para cada calle respectivamente.

$N$ : número de carriles por cada sentido de cada calle.

$f_a$ : factor de ajuste por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales, este valor se obtiene de las Tablas 14 a 19. Se consideró un ancho de banquina 0.00 [m], los anchos de carriles correspondientes a cada calle y los factores correspondientes a cada nivel.

$f_{vp}$ : factor de ajuste por presencia de vehículos pesados, explicado a continuación.

$f_c$ : factor de ajuste por tipo de conductor (laboral o fin de semana) (adoptamos 1.00).

El factor de ajuste por vehículos pesados se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{VP} = \frac{100}{100 + P_C(E_C - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (2)$$

en donde:

$P_C$  porcentaje de camiones.

$P_B$  porcentaje de ómnibus.

$P_R$  porcentaje de vehículos recreativos.

$EC$  automóviles equivalentes a un camión.

$EB$  automóviles equivalentes a un autobús.

$ER$  automóviles equivalentes a un vehículo recreativo.

Los valores de los vehículos equivalentes se indican en las Tablas 14 a 19 para cada calle respectivamente.

Por ejemplo, si el porcentaje contabilizado para camiones es del 0.7%, el de ómnibus es del 4.8% y no se registran vehículos recreativos, aplicando la expresión (2) tendremos

$$f_{VP} = \frac{100}{100 + 0.7(2 - 1) + 4.8(1.6 - 1)} = 0.965$$

Con estas expresiones calculamos la cantidad de vehículos por hora que pueden circular en cada calle para los diferentes niveles de servicios.

### RELEVAMIENTO DE TRÁNSITO

El relevamiento del tránsito se realizó únicamente para las horas pico, ya que son los caudales críticos los que nos interesan.

A partir de la confección de una planilla de campo, el método consiste en ubicarse en cada vía y registrar la cantidad de vehículos que circulan discriminándolos como se muestra en las Tablas: 1, 3, 5, 7, 9 y 11.

**TABLA 1:** RELEVAMIENTO DE TRÁNSITO CALLE 25 DE MAYO.

Nombre	Yair	Nombre calle Este-Oeste				
Fecha	04/04/2016	25 de mayo				
Día	Soleado	Livianos (autos, camionetas)	Motocicletas/ ciclomotores	Camiones	Ómnibus	Bicicletas
Horario de inicio	Horario de finalización					
11:00	11:15	235	34	2	9	5
11:15	11:30	230	68	0	14	3
11:45	12:00	229	55	2	12	4
12:00	12:15	222	54	1	10	3
12:30	12:45	195	43	2	11	2
12:45	13:00	216	45	3	11	1
Total		1327	299	10	67	18

La necesidad de discriminarlos por tipos de vehículos surge de la forma de interacción que posee cada uno en la vía.

Los horarios utilizados para el estudio se eligieron por considerarlos horarios de mayor volumen vehicular de la zona. Esto se debe a las características de la ciudad, que cuenta con la zona administrativa en la zona central, varias universidades y colegios, lo que genera concentraciones de tránsito en horarios similares.

Con los datos relevados confeccionamos las tablas de resumen para cada calle, en donde se muestran los porcentajes de cada tipo de vehículos (Tablas 2, 4, 6, 8, 10 y 12). Sólo se indican los vehículos livianos, ómnibus y camiones, ya que se considera que las motocicletas y las bicicletas no generan demoras en el tránsito. Estos porcentajes, posteriormente, se utilizarán para calcular vehículos equivalentes a automóviles livianos.

**TABLA 2:** RESUMEN CALLE 25 DE MAYO

Calle: 25 de mayo				
	Vehículos livianos	Camiones	Ómnibus	Sumatoria
Cantidad	1327	10	67	1404
Porcentaje	94.5	0.7	4.8	100

**TABLA 3:** RELEVAMIENTO DE TRÁNSITO CALLE GRAL. BELGRANO

Nombre	Yair	Nombre de la calle Norte-Sur				
Fecha	05/04/2016	Belgrano				
Días	Soleado	Livianos (autos, Camionetas)	Motocicletas/ ciclomotores	Camiones	Ómnibus	Bicicletas
horario de inicio	Horario de finalización					
11:00	11:15	118	28	2	6	1
11:15	11:30	180	33	0	7	2
11:45	12:00	139	30	0	4	0
12:00	12:15	158	19	2	5	1
12:30	12:45	148	30	1	4	0
12:45	13:00	144	35	5	4	0
Total		887	175	10	30	4

**TABLA 4:** RESUMEN CALLE GRAL. BELGRANO

Gral. Manuel Belgrano				
	Vehículos livianos	Camiones	Ómnibus	Sumatoria
Cantidad	887	10	30	927
Porcentaje	95.7	1.1	3.2	100

**TABLA 5:** RELEVAMIENTO DE TRÁNSITO CALLE GRAL. URQUIZA.

Nombre	Yair	Nombre calle este-Oeste				
Fecha	06/04/2016	Gral. Justo J. Urquiza				
Días	Soleado	Livianos (autos, Camionetas)	Motocicletas/ ciclomotores	Camiones	Ómnibus	Bicicletas
horario de inicio	Horario de finalización					
11:00	11:15	163	30	0	6	3
11:15	11:30	175	80	1	6	0
11:45	12:00	164	35	2	2	2
12:00	12:15	196	50	0	7	4
12:30	12:45	185	37	2	5	2
12:45	13:00	180	42	1	6	4
Total		1063	274	6	32	15

**TABLA 6:** RESUMEN CALLE GRAL. URQUIZA.

Gral. Justo J. Urquiza				
	Vehículos livianos	Camiones	Ómnibus	Sumatoria
Cantidad	1063	6	32	1101
Porcentaje	96.5	0.5	2.9	100

**TABLA 7:** RELEVAMIENTO DE TRÁNSITO CALLE ARTURO ILLIA

Nombre	Yair	Nombre de la calle Norte-Sur				
Fecha	07/04/2016	Arturo Illia				
Días	Soleado	Livianos (autos, Camionetas, tráfico)	Motocicletas/ ciclomotores	Camiones	Ómnibus	Bicicletas
horario de inicio	Horario de finalización					
11:00	11:15	75	16	1	2	4
11:15	11:30	94	22	1	2	2
11:45	12:00	102	28	1	2	0
12:00	12:15	125	29	0	2	1
12:30	12:45	119	17	0	3	3
12:45	13:00	112	13	1	2	2
Total		627	125	4	13	12

**TABLA 8:** RESUMEN CALLE ARTURO ILLIA

Arturo Illia				
	Vehículos livianos	Camiones	Ómnibus	Sumatoria
Cantidad	627	4	13	644
Porcentaje	97.4	0.6	2.0	100

**TABLA 9:** RELEVAMIENTO DE TRÁNSITO CALLE LEANDRO N. ALEM.

Nombre	Yair	Nombre calle este-Oeste				
Fecha	08/04/2016	Leandro N. Alem				
Días	Soleado	Livianos (autos, Camionetas)	Motocicletas/ ciclomotores	Camiones	Ómnibus	Bicicletas
horario de inicio	Horario de finalización					
11:00	11:15	101	13	1	5	3
11:15	11:30	126	32	0	7	1
11:45	12:00	149	30	2	5	5
12:00	12:15	132	21	0	9	0
12:30	12:45	112	18	3	6	4
12:45	13:00	124	20	1	5	4
Total		744	134	7	37	17

**TABLA 10:** RESUMEN CALLE LEANDRO N. ALEM

Leandro N. Alem				
	Vehículos livianos	Camiones	Ómnibus	Sumatoria
Cantidad	744	7	37	788
Porcentaje	94	1	5	100

**TABLA 11:** RELEVAMIENTO DE TRÁNSITO CALLE 9 DE JULIO

Nombre	Yair	Nombre de la calle Norte-Sur				
Fecha	09/04/2016	9 de Julio				
Días	Soleado	Livianos (autos, Camionetas)	Motocicletas/ ciclomotores	Camiones	Ómnibus	Bicicletas
horario de inicio	Horario de finalización					
11:00	11:15	86	9	0	3	2
11:15	11:30	119	15	2	4	0
11:45	12:00	128	21	0	2	3
12:00	12:15	111	23	0	5	1
12:30	12:45	124	12	1	3	0
12:45	13:00	103	13	0	1	0
Total		671	93	3	18	6

**TABLA 12:** RESUMEN CALLE 9 DE JULIO

9 de Julio				
	Vehículos livianos	Camiones	Ómnibus	Sumatoria
Cantidad	671	3	18	692
Porcentaje	97	0	3	100

También realizamos el relevamiento de las características físicas de las calles que indicamos en la Tabla 13.

En las Tablas 14 a 19 volcamos los valores que indican la cantidad de vehículo/hora que soporta cada una de las calles consideradas, para cada nivel de tránsito. Calculamos el flujo de servicio FS en la forma indicada en la expresión (1).

**TABLA 13:** CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS CALLES

Nombre	Ancho	Carriles de circulación	Carriles de estacionamiento	Ancho útil	Ancho de carril
25 de mayo	5.6	2	0	5.6	2.8
Gral. Manuel Belgrano	6	2	1	4.5	2.25
Gral. Justo J. Urquiza	6.7	2	1	5.2	2.6
Arturo Illia	5.6	2	1	4.1	2.05
9 de julio	6	2	1	4.5	2.25
Leandro N. Alem	6	2	1	4.5	2.25

**TABLA 14: CALLE 25 DE MAYO**

	v/c	f <sub>a</sub>	E <sub>C</sub>	E <sub>B</sub>	f <sub>VP</sub>	FS
A	0.07	0.49	2.0	1.8	0.957	131
B	0.19	0.49	2.2	2.0	0.947	353
C	0.34	0.49	2.2	2.0	0.947	631
D	0.59	0.49	2.0	1.6	0.965	1116
E	1	0.66	2.0	1.6	0.965	2549

**TABLA 15: CALLE GRAL. MANUEL BELGRANO**

	v/c	f <sub>a</sub>	E <sub>C</sub>	E <sub>B</sub>	f <sub>VP</sub>	FS
A	0.07	0.49	2.0	1.8	0.965	132
B	0.19	0.49	2.2	2.0	0.957	356
C	0.34	0.49	2.2	2.0	0.957	638
D	0.59	0.49	2.0	1.6	0.971	1122
E	1	0.66	2.0	1.6	0.971	2563

N= 2 carriles. Ancho de carril 2.80 m. Ancho de banquina 0.00 m.

C<sub>j</sub> = 2000 vph/carril. Composición del tránsito: 0,71% camiones y 4,77% ómnibus

**TABLA 16: CALLE GRAL. URQUIZA**

	v/c	f <sub>a</sub>	E <sub>C</sub>	E <sub>B</sub>	f <sub>VP</sub>	FS
A	0.07	0.49	2.0	1.8	0.972	133
B	0.19	0.49	2.2	2.0	0.966	360
C	0.34	0.49	2.2	2.0	0.966	643
D	0.59	0.49	2.0	1.6	0.978	1131
E	1	0.66	2.0	1.6	0.978	2581

N= 2 carriles. Ancho de carril 2.60 m. Ancho de banquina 0.00 m.

C<sub>j</sub> = 2000 vph/carril. Composición del tránsito: 0,54% camiones y 2,91% ómnibus

**TABLA 17: CALLE ARTURO ILLIA.**

	v/c	f <sub>a</sub>	E <sub>C</sub>	E <sub>B</sub>	f <sub>VP</sub>	FS
A	0.07	0.49	2.0	1.8	0.978	134
B	0.19	0.49	2.2	2.0	0.973	362
C	0.34	0.49	2.2	2.0	0.973	648
D	0.59	0.49	2.0	1.6	0.982	1136
E	1	0.66	2.0	1.6	0.982	2592

N= 2 carriles. Ancho de carril 2.05 m. Ancho de banquina 0.00 m.

C<sub>j</sub> = 2000 vph/carril. Composición del tránsito: 0.62% camiones y 2,02% ómnibus

**TABLA 18: CALLE LEANDRO N. ALEM**

	v/c	f <sub>a</sub>	E <sub>C</sub>	E <sub>B</sub>	f <sub>VP</sub>	FS
A	0.07	0.49	2.0	1.8	0.956	131
B	0.19	0.49	2.2	2.0	0.946	352
C	0.34	0.49	2.2	2.0	0.946	630
D	0.59	0.49	2.0	1.6	0.964	1115
E	1	0.66	2.0	1.6	0.964	2546

N= 2 carriles. Ancho de carril 2.25 m. Ancho de banquina 0.00 m.

C<sub>j</sub> = 2000 vph/carril. Composición del tránsito: 0,89% camiones y 4,70% ómnibus

**TABLA 19: CALLE 9 DE JULIO**

	v/c	f <sub>a</sub>	E <sub>C</sub>	E <sub>B</sub>	f <sub>VP</sub>	FS
A						
B	0.19	0.49	2.2	2.0	0.970	361
C	0.34	0.49	2.2	2.0	0.970	646
D	0.59	0.49	2.0	1.6	0.980	1134
E	1	0.66	2.0	1.6	0.980	2588

N= 2 carriles. Ancho de carril 2.25 m. Ancho de banquina 0.00 m.

C<sub>j</sub> = 2000 vph/carril. Composición del tránsito: 0,43% camiones y 2,60% ómnibus.

Resumiendo, expresamos en la Tabla 20 las cantidades de vehículos/hora para el nivel E correspondiente a cada calle. Tomamos el nivel E, que es el nivel previo al colapso de la vía.

**TABLA 20. FLUJO DE SERVICIO DEL NIVEL E**

Calle	[vph] Nivel E
25 de mayo	2549
Gral. Manuel Belgrano	2563
Gral. Justo J. Urquiza	2581
Arturo Illia	2592
Leandro N. Alem	2546
9 de Julio	2588

Además, necesitamos el caudal máximo horario, que lo obtendremos tomando la franja censada de 15 minutos más exigida, calcular el equivalente de camiones y ómnibus en automóviles, sumarle las motocicletas y las bicicletas, y por último multiplicarlo por 4, ya que consideramos que los 15 minutos era el menor período de tiempo en el que se podía producir un flujo estable. Todos los cálculos se realizan siempre para el Nivel E, que es el nivel que nos interesa a priori. Entonces:

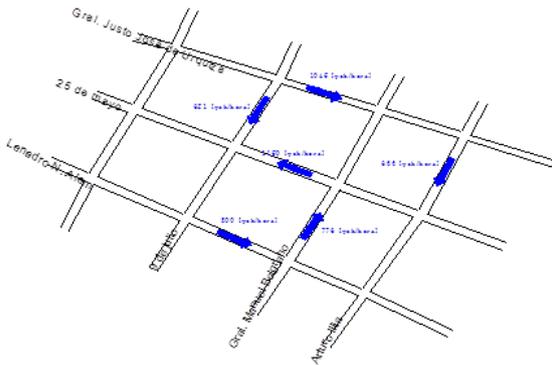
**TABLA 21. CAUDAL MÁXIMO HORARIO**

Calle	Franja horaria considerada	Equivalente en autos	autos+motos +bicicletas	Caudal horario máximo
25 de mayo	11:15 a 11:30	252	287	<b>1150</b>
Gral. Manuel Belgrano	12:00 a 12:15	170	194	<b>776</b>
Gral. Justo J. Urquiza	12:00 a 12:15	207	261	<b>1045</b>
Arturo Illia	12:00 a 12:15	128	158	<b>633</b>
Leandro N. Alem	11:45 a 12:00	165	200	<b>800</b>
9 de Julio	11:45 a 12:00	131	155	<b>621</b>

Con todos los datos procedemos a la construcción del modelo para la resolución de conflictos en el tránsito.

### CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

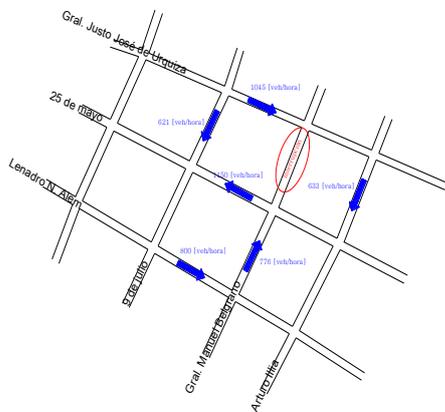
Para la construcción del modelo se consideró el esquema dado en la figura 2 que representa la zona urbana estudiada y los datos obtenidos anteriormente.



**Fig. 2:** Esquema de la zona estudiada

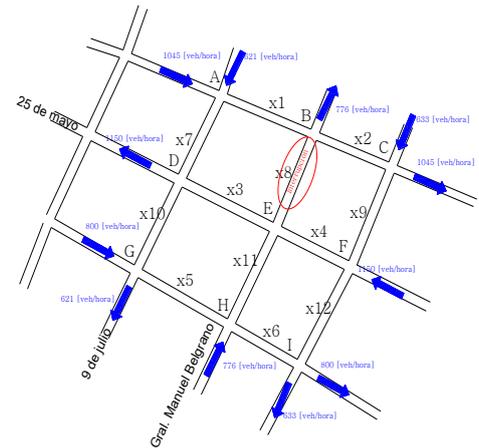
Los valores obtenidos del caudal horario máximo son representados por vectores, cuyos módulos, direcciones y sentidos están dados por el tránsito máximo correspondiente a cada calle, la orientación en la que se desarrolla cada calle y los sentidos de circulación de las mismas.

Ahora, supongamos que, por determinada circunstancia, el tránsito de calle Gral. Manuel Belgrano entre las calles 25 de mayo y Urquiza, debe ser bloqueado para realizar reparaciones en el pavimento y los inspectores de tránsito deben planificar el desvío de los vehículos, pero sin provocar congestión en otras vías adyacentes. Es decir, deben prever que las calles por donde se planifique la ruta alternativa, no alcancen su límite de capacidad y se produzca un embotellamiento.



**Fig. 3:** Esquema con tramo bloqueado

Para facilitar las expresiones, asignamos a cada intersección de calles una letra de la A a la I, y a cada tramo entre intersecciones la letra x y la numeración del 1 al 12.



**Fig. 4:** Esquema con identificación de tramos e intersecciones

Por ejemplo, si lo que deseamos es desviar el tránsito por 25 de mayo, deberíamos calcular cuál sería el nuevo tránsito que obtendríamos en dicha calle, compararlo con los caudales máximos que soporta esta vía, y así saber si esta solución es viable de realizar.

Expuesto el problema, expresamos esta información a través de un sistema de ecuaciones lineales. Para resolver la situación planteamos ecuaciones que contemplen los flujos de vehículos que interaccionan entre sí, para planificar una alternativa eficiente.

Como el tránsito que entra a una intersección, debe ser igual al que sale, proponemos una ecuación en la intersección que nos exprese esta situación, obteniendo así las siguientes ecuaciones detalladas por cada intersección:

En A:  $x_1 + x_7 = 621 + 1045$

En B:  $x_1 + x_8 = x_2 + 776$

En C:  $x_2 + 633 = x_9 + 1045$

En D:  $x_7 + x_3 = x_{10} + 1150$

En E:  $x_{11} + x_4 = x_3 + x_8$

En F:  $x_9 + 1150 = x_4 + x_{12}$

En G:  $x_{10} + 800 = x_5 + 621$

En H:  $x_5 + 776 = x_6 + x_{11}$

En I:  $x_6 + x_{12} = 800 + 633$

Las cuales constituyen el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{aligned}
 x_1 + x_7 &= 1066 \\
 x_1 - x_2 + x_8 &= 776 \\
 x_2 - x_9 &= 412 \\
 x_3 + x_7 - x_{10} &= 1150 \\
 x_3 - x_4 + x_8 - x_{11} &= 0 \\
 x_4 - x_9 + x_{12} &= 1150 \\
 x_5 - x_{10} &= 179 \\
 -x_5 + x_6 + x_{11} &= 776 \\
 x_6 + x_{12} &= 1433
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resolviendo dicho sistema por el método de Gauss-Jordan [4], se obtiene cada incógnita expresada como:

$$x_1 = -x_8 + x_9 - x_{10} + x_{11} - x_{12} + 1166$$

$$x_2 = x_9 - x_{10} + x_{11} - x_{12} + 890$$

$$x_3 = -x_8 + x_9 + x_{11} - x_{12} + 1150$$

$$x_4 = x_9 - x_{12} + 1150$$

$$x_5 = x_{10} + 179$$

$$x_6 = x_{10} - x_{11} + 955$$

$$x_7 = x_8 - x_9 + x_{10} - x_{11} + x_{12}$$

Destacamos la expresión correspondiente a  $x_3$ , que es la que nos interesa, ya que lo que se busca es el nuevo caudal de tránsito

$$x_3 = -x_8 + x_9 + x_{11} - x_{12} + 1150$$

Como podemos ver,  $x_3$  es función de  $x_8$ ,  $x_9$ ,  $x_{11}$  y  $x_{12}$ ; y el valor 1150 corresponde al caudal de vehículos/hora que circula por la misma calle.

Es importante en este punto razonar lo que nos dice la ecuación. El valor de  $x_3$  dependerá de la interacción de las calles que aporten y extraigan caudales de tránsito. Observando el plano, vemos que  $x_9$  y  $x_{12}$  corresponden al flujo de la calle Arturo Illia, que corta a 25 de mayo; ambas aportan y extraen tránsito de la intersección F entre dichas arterias;  $x_8$  y  $x_{11}$  presentan similar situación para la intersección E, entre 25 de mayo y Gral. Manuel Belgrano.

Si consideramos que la variable  $x_8$  corresponde al tramo de calle en donde se producirá la interrupción de la misma, a dicha variable la consideramos nula. Luego:  $x_8 = 0$ . Al no contar con datos de los flujos de vehículos que, al llegar a una intersección cualquiera, continúan por la misma calle o doblan, consideraremos que el total de vehículos que llegan a la intersección F, por Arturo Illia, continúan por la misma calle, entonces:  $x_9 = x_{12}$ . Por lo tanto, la ecuación se reduce a la siguiente:  $x_3 = x_{11} + 1150$ . Sabemos que  $x_{11}$  es el caudal de vehículos que circula por Gral. Manuel Belgrano hacia 25 de mayo, entonces:  $x_{11} = 776$ .

Luego, el valor final para  $x_3$  será  $x_3 = 776 + 1150 = 1926$  vehículos/hora que está por debajo del valor máximo de caudal de tránsito que soporta la calle.

Entonces podemos concluir que el desvío del tránsito de calle Gral. Manuel Belgrano hacia la calle 25 de mayo es factible de realizar sin producir mayores conflictos en el mismo.

## A MODO DE CIERRE

Se ha presentado el análisis del comportamiento del tránsito vehicular aplicando Sistemas de Ecuaciones Lineales, contenido principal del curso de Álgebra Lineal, para desarrollar competencias en Ingeniería que se basen en

un problema real y cuyos fundamentos son aportados por un docente invitado del Ciclo Superior.

Con una base de datos de campo como fuente de información, el método es apto para ser programado con el uso de software matemático (SCILAB), como una actividad extra para la cual los alumnos tienen horas reservadas, y puede ser extendido a un número mayor de situaciones que se puedan generar en las vías de tránsito (disminución de la capacidad de determinada calle, tareas de mantenimiento, etc.). La potencialidad del procedimiento se evidencia si se releva mayor información sobre el caudal de tránsito hora por hora, de manera que un cambio factible se realice cuando el volumen del tránsito disminuye. Aquí es el profesional encargado quien indica al alumno del Ciclo Básico cómo el tema tiene inserción en la profesión.

De esta manera, la propuesta tiene el propósito de mostrar cómo el contenido ya desarrollado y ejercitado en la asignatura de primer año se aplica en la realidad profesional. El ingeniero que colabora en esa exposición acerca la experiencia de campo y señala la importancia del relevamiento de datos, siendo el estudiante de materias básicas quien se encarga de la lectura de los mismos y la comprensión del algoritmo utilizado. La distancia académica que separa las asignaturas es recorrida a través de la aplicación de Sistemas de Ecuaciones Lineales a un caso real, un tema al alcance del alumno, que logra interactuar con los docentes de la asignatura y articula ese conocimiento con el aporte desde la profesión.

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos la colaboración de la Mg. Prof. Graciela Yugdar Tófaló, titular de la cátedra Inglés.

## REFERENCIAS

- [1] <https://www.google.com.ar/maps/place/Paraná,+Entre+Ríos/>
- [2] INSTITUTO MEXICANO DE TRANSPORTE. Secretaría de comunicaciones y transportes (1991). Manual de Capacidad Vial de 1985. México. Disponible en <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt17.pdf>
- [3] CAL Y MAYOR, R; CÁRDENAS, J. (2007). Ingeniería de tránsito. Fundamentos y Aplicaciones. Octava Edición. México: Alfaomega. p.327-328, 336.
- [4] GROSSMAN, S. (2008). Álgebra Lineal. México: McGraw-Hill. 634p.