



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría en Transportes

“Comparación entre el Método de Factores de Ajuste para flujos de saturación vehicular y el esquema de estimación simultánea de densidad y velocidad basado en el modelo macroscópico LWR”

Janneth Alexandra Velasco

Quito, Mayo del 2015

Dedicatoria

A mis padres
Sonia y José

Agradecimiento

La culminación de esta tesis implicó una considerable colaboración y apoyo de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, a ella mi infinita gratitud. Mi gran agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la PUCE, en particular al Ing. Fredi Paredes, Director de la Maestría en Ingeniería de Transportes, por su comprensión y estímulo. Mi reconocimiento especial a la Dra. Martha Grijalva, Directora del Departamento de Matemáticas de la PUCE, por su inestimable ayuda para la finalización de este trabajo.

Estaré siempre en deuda con mi familia, Sonia, José, Silvana, David y Daniel, al igual que con mis amigos Tania Borja y Darwin Narváez, por su ayuda, ánimo y colaboración.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimiento	III
Introducción	XIII
Alcance	XV
Objetivos	XVII
1. Modelación del flujo vehicular	1
1.1. Introducción	1
1.2. Análisis de la modelación macroscópica	2
1.2.1. Definición de variables utilizadas en los modelos macroscópicos	2
1.2.2. Análisis del flujo vehicular en autopista	3
1.2.3. Diagrama fundamental	5
1.2.4. Modelos de primer orden	7
2. Resolución de la ecuación de Burgers	11
2.1. Resolución analítica de la ecuación de Burgers	11
2.1.1. Solución clásica de la ecuación de Burgers	11
2.1.2. Solución débil de la ecuación de Burgers	12
2.1.3. Aplicación al tráfico vehicular [7]	12
2.2. Resolución numérica de la ecuación de Burgers	16
2.2.1. Esquemas de diferencias finitas explícitos ^[6]	18
2.2.2. Discretización para el modelo LWR ^[6]	19
2.2.3. Aplicación de la discretización del modelo LWR a un problema de tráfico vehicular ^[6]	20

2.2.4.	Modelización macroscópica heterogénea de la ecuación de Burgers ^[3]	21
3.	Método de factores de ajuste para flujos saturados	25
3.1.	Flujo de saturación	25
3.2.	Cálculo del flujo vehicular ^[19]	25
3.2.1.	Factor de ajuste por ancho de carril (f_w)	26
3.2.2.	Factor de ajuste para vehículos pesados (f_{HV})	26
3.2.3.	Factor de ajuste debido a la pendiente (f_g)	27
3.2.4.	Factor de ajuste debido al estacionamiento en carril (f_p)	27
3.2.5.	Factor de ajuste al bloque de buses en paradas (f_{bb})	27
3.2.6.	Factor de ajuste según el tipo de área (f_a)	28
3.2.7.	Factor de ajuste por utilización de carril (f_{LU})	28
3.2.8.	Factor de ajuste debido a giros izquierdos (f_{LT})	28
3.2.9.	Factor de ajuste debido a giros derecho (f_{RT})	29
3.2.10.	Factor de ajuste por peatones en giros izquierdo (F_{Lpb}) y derecho (f_{Rpb})	29
4.	Estimación de la velocidad vehicular	31
4.1.	Modelo de transmisión por celdas (secciones) ^[16]	31
4.2.	Modelo de Modos Conmutados ^[17]	32
4.3.	Esquema de estimación simultánea de densidad y velocidad ^[17]	33
4.3.1.	Modelo de flujo libre	33
5.	Simulación y análisis de errores	37
5.1.	Noción de algoritmo	37
5.2.	Algoritmos y programas	37
5.3.	Tipos de errores	38
5.3.1.	Errores en los datos de entrada o errores inherentes	38
5.3.2.	Errores de redondeo	38
5.3.3.	Errores de aproximación	38
5.4.	Error de truncamiento para la ecuación de advección ^[7]	38
5.5.	Errores de truncamiento para métodos explícitos ^[7]	42
5.6.	Algoritmo para la estimación de velocidades en las sección del tramo de la Autopista General Rumiñahui comprendido entre le puente 5 y puente 7	42

6. Recopilación de datos y cálculos	47
6.1. Recopilación de datos	47
6.2. Cálculos por el método de factores de ajuste	48
6.3. Cálculos de la estimación de velocidad	54
7. Resultados y conclusiones	57
7.1. Resultados	57
7.2. Conclusiones	58
7.3. Recomendaciones	58
Bibliografía	59
8. Anexos	61
Anexo A Informes de conteo de automóviles en la Autopista "General Rumiñahui"	63
Anexo B Fotos de tramos en la autopista "General Rumiñahui"	77

Índice de figuras

1.1. Flujo vehicular en una sección $I = [x_1, x_2]$	4
1.2. Relación velocidad - densidad	6
1.3. Relación de equilibrio según Greenshields. Régimen fluido	7
1.4. Relación de equilibrio según Greenshields. Régimen congestionado	7
2.1. Condición inicial	13
2.2. Solución débil en 4 intervalos	14
2.3. Onda de choque	15
2.4. Modelo LWR	20
4.1. Tramo de autopista dividida en secciones	31
4.2. Esquema de división SMM	32
4.3. Tramo de autopista dividida en 5 secciones	33
4.4. Autopista General Rumiñahui (puente 5 a puente 7)	34
6.1. Tramo dividide en 5 secciones de 300 400 300 300 400	47
8.1. Plantilla de conteo manual	63
8.2. Foto 1 A2 300m (25m puente 5 275m)	77
8.3. Foto 2 B2 400m (entre puente 5 y puente 6)	78
8.4. Foto 3 C2 300m (230m puente 6 70m)	78
8.5. Foto 4 D2 300m (entre puente 6 y puente 7)	79
8.6. Foto 5 E2 400m(380m antes puente6 20m después puente 7)	79
8.7. Foto 6 E2 final (20m después puente 7)	80

Índice de cuadros

6.1. Régimen de tráfico fluido (primer día de mediciones)	48
6.2. Régimen de tráfico fluido (segundo día de mediciones)	48
6.3. Régimen de tráfico fluido (tercer día de mediciones)	48
6.4. Factores de ajuste para tráfico fluido (primer día de mediciones)	49
6.5. Factores de ajuste para tráfico congestionado (primer día de mediciones) .	49
6.6. Flujo para tráfico fluido (primer día de mediciones)	50
6.7. Flujo para tráfico congestionado (primer día de mediciones)	50
6.8. Factores de ajuste para tráfico fluido (segundo día de mediciones)	51
6.9. Factores de ajuste para tráfico congestionado (segundo día de mediciones) .	51
6.10. Flujo para tráfico fluido (segundo día de mediciones)	51
6.11. Flujo para tráfico congestionado (segundo día de mediciones)	52
6.12. Factores de ajuste para tráfico fluido (tercer día de mediciones)	52
6.13. Factores de ajuste para tráfico congestionado (tercer día de mediciones) . .	53
6.14. Flujo para tráfico fluido (tercer día de mediciones)	53
6.15. Flujo para tráfico congestionado (tercer día de mediciones)	53

Introducción

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de las variables de tráfico en un tramo de autopista, bajo ciertas condiciones, estas no permiten analizar el flujo vehicular como un flujo de un fluido.

Puesto que el flujo vehicular en autopista se comporta de diferente manera al flujo vehicular en las ciudades, de la literatura existe para flujos vehiculares, seleccionamos los métodos que estudian el flujo vehicular macroscópico.

Se ha utilizado una metodología que nos permite poner en evidencia las ventajas y desventajas de los análisis macroscópicos y microscópicos del tráfico vehicular.

Los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil de la PUCE realizaron las mediciones del flujo vehicular, en un tramo recto de la Autopista General Rumiñahui con dos carriles en un solo sentido y sin rampas de acceso. Los datos recolectados fueron analizados mediante el método de Factores de Ajuste para flujos de Saturación que nos permite sacar conclusiones acerca del flujo vehicular, y por el Esquema de Estimación para el Cálculo de Velocidad y Densidad simultáneas, (basado en el modelo de primer orden LWR) gracias al que pudimos estimar la velocidad en el tramo estudiado.

Janneth Alexandra Velasco

Alcance

Es este trabajo se pretende analizar el flujo vehicular en un solo sentido en un tramo de autopista de 1500m cuando el flujo es fluido.

- Realizar cálculos utilizando los métodos basados en la modelación macroscópica y en la modelación microscópica.
- Determinar las ventajas y desventajas que brinda cada uno de los dos métodos para el análisis del flujo vehicular en el tramo de Autopista examinado.
- Estimar la velocidad vehicular utilizando un esquema numérico apropiado.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la información obtenida por el método de Factores de Ajuste y por el Esquema numérico basado en el modelo macroscópico LWR.

Objetivos específicos

- Procesar la información recolectada en un tramo de autopista, para ser analizada mediante el Método de Factores de Ajuste y el Esquema numérico basado en el modelo de primer orden LWR
- Establecer que variables pueden ser calculadas con cada uno de los dos modelos utilizados.
- Determinar las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos utilizados.

Capítulo 1

Modelación del flujo vehicular

1.1. Introducción

Para la modelación del flujo vehicular necesitamos obtener información de datos tomados experimentalmente.

A partir de los datos experimentales, obtenemos las variables necesarias para una descripción matemática del problema.

El número y la clase de variables tomadas determinan el tipo de modelación que es posible realizar.

Las ecuaciones modeladas son ecuaciones en derivadas parciales y en muchos casos son no lineales. Debido a ello se debe estudiar las características de las ecuaciones y los métodos numéricos adecuados para resolverlas.

Para el flujo vehicular es importante definir que tipo de flujo vehicular se pretende describir, si se quiere describir el flujo global de vehículos no será posible examinar el movimiento individual de vehículos. Si por el contrario cuando nos preocupamos por describir el movimiento individual de un vehículo se pierde de vista el análisis global de movimiento.

Esto da lugar a tres maneras de analizar el fenómeno del flujo vehicular:

- Un análisis macroscópico, en el que el flujo vehicular en carreteras es analizado como un flujo compresible que estará determinado por variables macroscópicas que describen como se comporta el flujo. Variables como densidad, velocidad proporcionan información acerca del comportamiento del flujo. Para analizar este tipo de flujo se trabaja con modelos que describen cualitativamente el comportamiento colectivo del flujo, existen algunos modelos para estudiarlo, ellos dependen del número de variables involucradas.
- Un análisis cinético, para el que se considera una función de distribución que proporciona información acerca del número de vehículos que tienen velocidad instantánea en un intervalo Δv en un tramo Δx en un tiempo t . En este análisis se considera el comportamiento habitual de los conductores frente a las velocidades, así como también la interacción entre vehículos.

- Un análisis microscópico, que permite estudiar el comportamiento de cada vehículo como parte de un conjunto, tomando en cuenta reglas particulares para su movimiento. Existe un gran número de modelos que analizan el comportamiento individual de los vehículos.

Ahora veamos como se comporta el tráfico vehicular macroscopicamente.

1.2. Análisis de la modelación macroscópica

Los modelos macroscópicos describen el comportamiento del flujo vehicular como el de un flujo en régimen del flujo compresible.

Este tipo de modelos proporcionan resultados cualitativos que describen muy bien el comportamiento empírico que se observa en el flujo vehicular, permiten en algunos casos trabajar solo analíticamente, el efecto de rampas de entrada y salida no es significativo, dan la posibilidad de considerar el flujo en varios carriles, computacionalmente son más eficientes que los modelos microscópicos.

Sin embargo están restringidos a la descripción de variables globales que no analizan cada vehículo, ellos reflejan cantidades promediadas.

1.2.1. Definición de variables utilizadas en los modelos macroscópicos

Definición de flujo

Sea Δt un intervalo de tiempo, el **flujo** $q(x, t)$ es el número de vehículos $N(x, t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2})$ observados en un punto de la autopista x en el intervalo Δt :

$$q(x, t) = \frac{N(x, t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2})}{\Delta t}$$

Definición de densidad

Sea Δx un tramo de autopista, la **densidad** $\rho(x, t)$ es el número de vehículos $N(t, x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2})$ observados en el instante t en el tramo de autopista Δx :

$$\rho(x, t) = \frac{N(t, x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2})}{\Delta x}$$

Para un flujo uniforme, es decir cuando todos los vehículos tienen igual velocidad, la velocidad promedio del flujo q es igual a la velocidad v de los automóviles. El número de vehículos en un tramo de autopista Δx en todo instante es:

$$N = \rho \Delta x.$$

Al ser la velocidad de flujo igual a la de todos los vehículos se tiene que:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$$

es el tiempo para que los N vehículos dejen el tramo considerado.

Luego el flujo saliente del tramo de autopista es:

$$q = \frac{N}{\Delta t} = \rho \Delta x \cdot \frac{v}{\Delta x} = \rho v.$$

Por tanto, definimos la velocidad de flujo $v(x, t)$ en un punto x del tramo de autopista y en un instante t por:

$$v(x, t) = \frac{q(x, t)}{\rho(x, t)}.$$

Definición de velocidad de flujo

La **velocidad de flujo** $v(x, t)$ en un punto x del tramo de autopista y en un instante t es:

$$v(x, t) = \frac{q(x, t)}{\rho(x, t)}.$$

1.2.2. Análisis del flujo vehicular en autopista

Para nuestro estudio consideramos el flujo vehicular a lo largo de una autopista de un solo carril, en una sola dirección; obteniendo un problema en una dimensión y en una dirección.

Examinemos el caso de una autopista donde hay un número fijo de vehículos, lo que podemos representarlo por

$$N(x, t) = \int \rho(x, t) dx = \text{constante},$$

donde N es el número total de vehículos en la carretera, ρ es la densidad.

Si ahora examinamos un tramo de autopista $[x_1, x_2]$ tendremos

$$N(x, t) = \int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) dx.$$

Para obtener una ecuación de evolución para la densidad tenemos que el cambio de la densidad temporalmente está dado por:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) dx,$$

que es igual al número de vehículos que entran en x_1 menos el número de vehículos que salen en x_2 por unidad de tiempo.

Si llamamos al número de vehículos que entran o salen de un tramo de autopista por unidad de tiempo, $q(x, t)$, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) dx = q(x_1, t) - q(x_2, t).$$

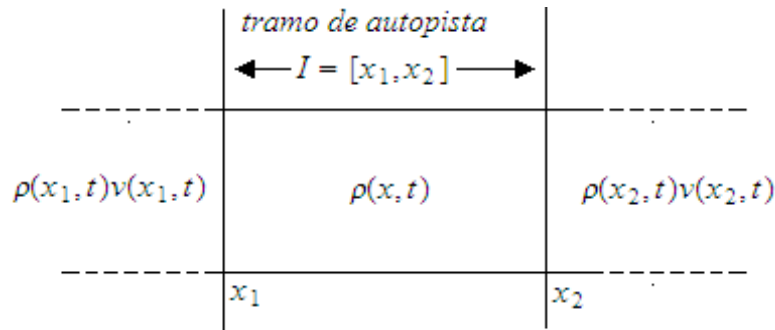


Figura 1.1: Flujo vehicular en una sección $I = [x_1, x_2]$

Si el flujo vehicular es una función bastante regular, podemos aplicar el teorema fundamental de cálculo para funciones continuas, y obtenemos

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) dx = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} dx.$$

Como esto es válido para cualquier tramo de carretera y para cualquier $t > 0$ se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) dx = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} dx,$$

para toda $x \in \mathbb{R}$ y para todo $t > 0$.

Y obtenemos

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) dx = - \frac{\partial q(x, t)}{\partial x}$$

y se cumple que

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) dx + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} dx + \frac{\partial (\rho(x, t) v(x, t))}{\partial x} = 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}, t > 0$$

que es la ecuación de continuidad.

Esta ecuación es válida cuando hay conservación de la cantidad, en nuestro caso, la densidad.

A esta ecuación, debemos asociar una condición inicial en $t = 0$ que es:

$$\rho(x, 0) = \rho_0(x) \quad \forall x \in \mathbb{R}, t > 0.$$

La ecuación

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) dx + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \\ \rho(x, 0) = \rho_0(x) \end{cases} \quad \forall x \in \mathbb{R}, t > 0.$$

se llama la ecuación de conservación de la masa o ecuación de continuidad.

1.2.3. Diagrama fundamental

La ecuación de continuidad en la que se basan los modelos de primer orden corresponde al diagrama fundamental.

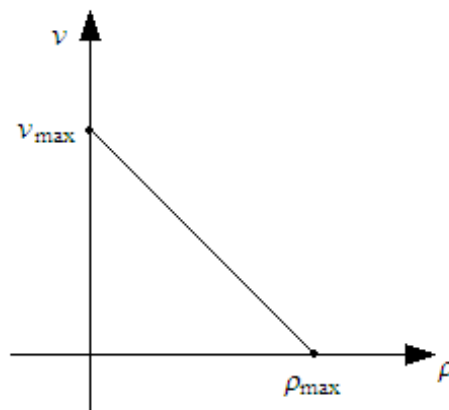


Figura 1.2: Relación velocidad - densidad

Las principales características del diagrama fundamental están basadas en observaciones lógicas.

- cuando la concentración se aproxima a cero, las interacciones entre vehículos son muy limitadas, luego los vehículos se mueven a su velocidad máxima permitida v_I
- cuando la concentración aumenta, las interacciones entre vehículos son más fuertes, luego su velocidad disminuye
- la concentración es acotada para un cierto valor $\rho_{\text{máx}}$ (esta cota corresponde al caso límite de una carretera en la que los vehículos están detenidos unos tras de otros). En el caso de una carretera de n carriles se tienen:

$$\rho_{\text{máx}}(x, t) = \frac{n}{L},$$

donde L es el largo de un vehículo más el largo de un bucle electromagnético

$$\rho_{\text{máx}}(x, t) = \frac{n}{L}.$$

Utilizando medidas experimentales, Greenshields, supone un decrecimiento lineal de la velocidad y la concentración

$$v(x, t) = v_{\text{máx}}(x, t) \left(1 - \frac{\rho(x, t)}{\rho_{\text{máx}}(x, t)} \right)$$

De él se desprende un diagrama que da lugar a dos regímenes de flujo, el límite entre los dos se llama densidad crítica y es notada $\rho_{\text{crit}}(x, t)$ y la velocidad correspondiente es $v_{\text{crit}}(x, t)$.

Analícemos estos dos regímenes:

- El primero es el régimen fluido por el cual un aumento en la concentración se traduce por un aumento del flujo.

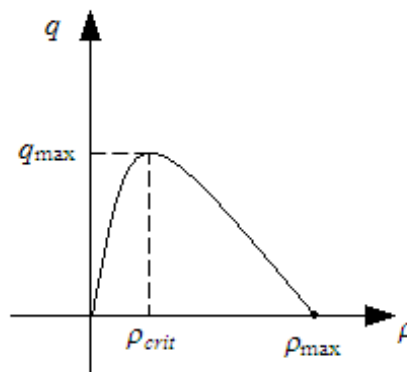


Figura 1.3: Relación de equilibrio según Greenshields. Régimen fluido

- El segundo es el régimen congestionado que se traduce por una disminución del flujo cuando la concentración aumenta.

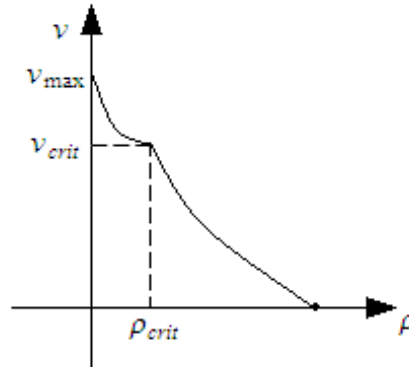


Figura 1.4: Relación de equilibrio según Greenshields. Régimen congestionado

Bajo la hipótesis de Greenshields , el modelo LWR se escribe

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + v_{\text{máx}}(x, t) \left(1 - \frac{2\rho(x, t)}{\rho_{\text{máx}}(x, t)} \right) \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = 0$$

que introduciendo nuevas coordenadas permite obtener la ecuación de Burgers

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \rho(x, t) \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = 0$$

que es una ecuación no lineal de primer orden.

Esta ecuación da lugar a los modelos de primer orden para flujos vehiculares.

1.2.4. Modelos de primer orden

Cuando se describe únicamente el fenómeno en términos de densidad, debemos formular una ecuación que nos diga como varía la velocidad promedio con la evolución de la densidad, es decir necesitamos una ecuación en derivadas parciales donde la densidad es la única función por determinarse al resolver la ecuación diferencial.

Cuando se considera también en la ecuación, la velocidad promedio de los vehículos, se formula una ecuación adicional para la velocidad, para ello se necesitara información acerca de la velocidad.

Teniendo en cuenta lo anterior los modelos que consideran únicamente la densidad como variable relevante se conocen como modelos de primer orden, y los que consideran a la velocidad y densidad como variables relevantes son los modelos de segundo orden.

Entre los modelos de primer orden esta el que será nuestro objeto de estudio, es el modelo LWR.

Modelo LWR

El primer modelo macroscópico fue desarrollado simultáneamente por Lighthill y Whitham y por Richards.

Ellos consideran para la ecuación del flujo vehicular, la ecuación de Greenshields

$$q(\rho(x, t)) = \rho(x, t) V_{\text{máx}}(x, t) \left(1 - \frac{\rho(x, t)}{\rho_{\text{máx}}(x, t)} \right)$$

donde $V_{\text{máx}}(x, t)$ es velocidad máxima permitida en la autopista y $\rho_{\text{máx}}(x, t)$ la densidad máxima en el intervalo.

La ecuación proporciona información cualitativa acerca del flujo vehicular es mayor a densidades bajas y es mínimo a densidades altas, también que el flujo es función de (x, t) sólo a través de la densidad.

Sustituyendo la ecuación de Greenshields, en la ecuación de continuidad, ellos obtuvieron:

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + v_{\text{máx}}(x, t) \left(1 - \frac{2\rho}{\rho_{\text{máx}}(x, t)} \right) \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = 0$$

que se transforma en la ecuación de Burgers sin viscosidad, gracias a los siguientes cambios.

1. Tomando variables adimensionales.

$$\begin{aligned} x' &= \rho_{\text{máx}}(x, t) x \\ t' &= \rho_{\text{máx}}(x, t) v_{\text{máx}}(x, t) t \end{aligned}$$

2. Haciendo un cambio lineal en la escala de densidad

$$\rho(x, t) = \rho_{\text{máx}}(x, t) \left(\frac{1 - \rho'(x, t)}{2} \right).$$

Luego se tiene

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \rho(x, t) \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = 0.$$

Ecuación que con condiciones de frontera respecto a x , es:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \rho(x, t) \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = 0 \\ \rho(0, t) = \rho(L, t), \quad t > 0 \\ \rho(x, 0) = \rho_0(x), \quad 0 < x < L \\ \quad \quad \quad = \varphi(x) \end{array} \right.$$

Esta última ecuación será objeto de un estudio más detallado en el siguiente capítulo.

Modelo LWD

Basados en el modelo LWR se tiene, Modelo de Lighthill-Witham con difusión (LWD)

En 1974 Lighthill consideró una modificación en el modelo LWR, mediante la ecuación

$$q(x, t) = \rho(x, t) v_{\text{máx}} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{máx}}} \right) - D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x},$$

donde D es una constante positiva llamada coeficiente de difusión.

La sustitución de esta ecuación en la ecuación de continuidad nos da:

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + v_{\text{máx}}(x, t) \left(1 - \frac{2\rho(x, t)}{\rho_{\text{máx}}(x, t)} \right) \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} - D \frac{\partial^2 \rho(x, t)}{\partial x^2} = 0.$$

Esta es la ecuación de Burgers, pero con un término de segundas derivadas parciales, ella puede escribirse también en términos adimensionales, efectuando algunos cambios

$$\begin{aligned} x' &= \rho_{\text{máx}}(x, t) \cdot t \\ t' &= \rho_{\text{máx}}(x, t) v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t \\ \rho'(x, t) &= \rho_{\text{máx}}(x, t) \left(\frac{1 - \rho'(x, t)}{2} \right) \\ D' &= \frac{\rho_{\text{máx}}(x, t)}{v_{\text{máx}}(x, t)} D. \end{aligned}$$

con lo que se obtiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \rho}{\partial x} - D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} = 0.$$

Modelo de Nelson

Nelson se basa en el modelo LWD, pero modifica el coeficiente de difusión, con el objetivo de lograr la descripción "del flujo sincronizado".

Modelo de Jordan

Este modelo propone tomar en cuenta el tiempo de reacción para los conductores ante los cambios que se presentan a cualquier distancia delante de ellos.

Capítulo 2

Resolución de la ecuación de Burgers

2.1. Resolución analítica de la ecuación de Burgers

2.1.1. Solución clásica de la ecuación de Burgers

Un problema de ecuaciones en derivadas parciales de primer orden no lineal o cuasi-lineal es de la forma

$$\begin{cases} a(x, t, u) \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + b(x, t, u) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + c(x, t, u) = 0 & -\infty < x < \infty \\ u(x_0(s), t_0(s)) = \varphi(s) & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Para garantizar la existencia y unicidad local de este problema se tiene el siguiente teorema: [18]

Teorema 1 *Si se tiene que:*

1. $a(x, t, u)$, $b(x, t, u)$ y $c(x, t, u)$ son continuamente diferenciables en D con

$$D = \{(x, t, u) \mid x > -\infty, u < \infty, t > 0\}.$$

2. la curva $(x_0(s), t_0(s), \varphi(s))$ está en D y es de clase c^1

3.
$$\begin{vmatrix} a(x_0(s), t_0(s), u_0(s)) & x'_0(s) \\ b(x_0(s), t_0(s), u_0(s)) & t'_0(s) \end{vmatrix} \neq 0$$

Entonces existe una solución continuamente diferenciable de [1] para alguna vecindad de la curva inicial. A esta solución se la conoce como solución clásica del problema.

En nuestro caso, la ecuación de Burgers es un caso particular del problema cuasi-lineal, así se tiene

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial f(\rho(x, t))}{\partial x} = 0 & x \in (-\infty, \infty), t > 0 \\ \rho(x, 0) = \varphi(x) & x \in (-\infty, \infty) \end{cases}$$

con f una función continuamente diferenciable.

Para la resolución de este problema cuasi-lineal se puede utilizar el método de las características, pero las curvas encontradas pueden no existir par cualquier x_0 , aunque $\varphi(x)$ sea una función muy regular.

Luego este problema no tiene solución clásica y se obtiene una solución débil.

2.1.2. Solución débil de la ecuación de Burgers

Para garantizar la existencia y unicidad de una solución débil cuando f es convexa, se tiene el siguiente teorema.

Teorema 2 *Supongamos que $f''(u) > 0$ y que $a(u) = f'(u)$ es creciente y $\varphi(x)$ es integrable en los reales, entonces a lo más hay una solución débil del problema [18]*

$$\begin{cases} a(x, t, u) \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + b(x, t, u) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + c(x, t, u) = 0 & -\infty < x < \infty \\ u(x_0(s), t_0(s)) = \varphi(s) & t > 0 \end{cases}$$

Este teorema garantiza que el problema de Burger

$$\begin{cases} a(x, t, u) \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + b(x, t, u) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + c(x, t, u) = 0 & -\infty < x < \infty \\ u(x_0(s), t_0(s)) = \varphi(s) & t > 0 \end{cases}$$

con $f(\rho(x, t)) = \frac{\rho^2(x, t)}{2}$ tiene una única solución débil para toda condición inicial que sea integrable en los reales.

Un ejemplo de una aplicación de la ecuación Burgers al tráfico vehicular la tenemos de la tenemos a continuación.

2.1.3. Aplicación al tráfico vehicular [7]

Se tiene una calle de longitud infinita en la que la posición $x = 0$ hay un semáforo. Supóngase que al tiempo $t = 0$ éste está en rojo y que los vehículos del lado izquierdo de la calle no pueden pasar por lo que se comienzan a acumular en un carril, defensa contra defensa, hasta la posición $x = -\frac{L}{2}$ para alguna $L > 0$.

Cuando el semáforo cambia la densidad en el tiempo $t > 0$ está dada por la ecuación de Greenshields, entonces;

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial f(\rho(x, t))}{\partial x} = 0, \quad -\infty < x < \infty, t > 0$$

con $q(\rho(x, t)) = v_{\text{máx}}(x, t) \left(1 - \frac{\rho(x, t)}{\rho_{\text{máx}}(x, t)}\right)$.

La condición inicial, está dada por

$$\varphi(x, 0) = \begin{cases} 0 & x \leq -\frac{1}{2} \\ \rho_{\text{máx}}(x, t) & -\frac{1}{2} < x < 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases}$$

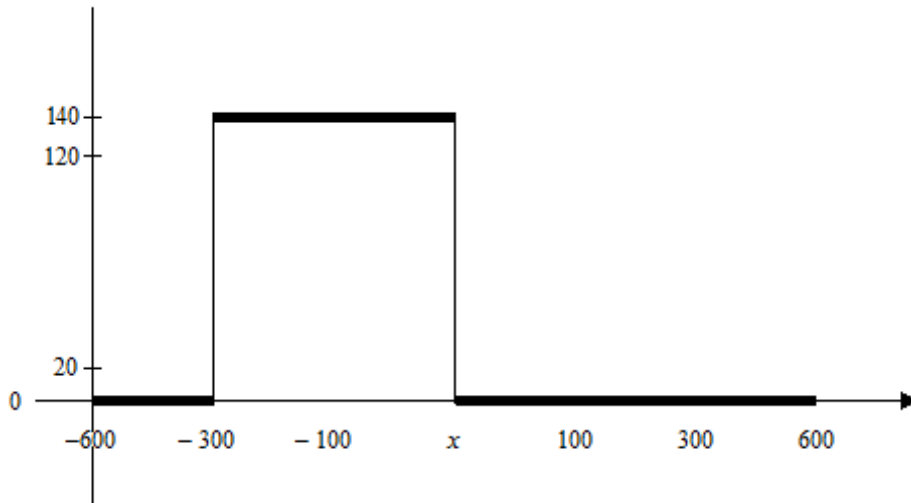


Figura 2.1: Condición inicial

Se define

$$x(t) = \begin{cases} x_0 + v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t & x_0 \leq -\frac{1}{2} \\ x_0 - v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t & -\frac{1}{2} < x_0 < 0 \\ x_0 + v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t & x_0 \geq 0 \end{cases}$$

Podemos observar el comportamiento de estas en 4 secciones:

1. cuando $x_0 = -\frac{1}{2}$, se intersecan las curvas $x_0 + v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t$ y las curvas $x_0 - v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t$
2. cuando $t = -\frac{x}{v_{\text{máx}}(x, t)}$, $x = -tv_{\text{máx}}(x, t)$ y $t = \frac{x}{v_{\text{máx}}(x, t)}$, $x = tv_{\text{máx}}(x, t)$ hay una zona vacía sin curvas.
3. cuando $t > \frac{x}{v_{\text{máx}}(x, t)}$, aparecen $x_0 + v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t$.

4. cuando $-\frac{1}{2} < x < 0$, se forma una onda de choque que satisface

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= \frac{(f(u_D) - f(u_I))}{\rho_{\text{máx}}(x, t)} = 0, \\ y(0) &= -\frac{1}{2}. \end{aligned}$$

$y(t) = -\frac{1}{2}$ es la ecuación de esta curva de discontinuidades que satisface también la condición ii)

$$\begin{aligned} g(\rho_{\text{máx}}(x, t)) &= -v_{\text{máx}}(x, t) < 0 < v_{\text{máx}}(x, t) = g(0), \\ g(u_D) &< \frac{dy}{dt} < g(u_I). \end{aligned}$$

De acuerdo a lo anterior la solución débil tiene cuatro comportamientos distintos dependiendo de cada sección.

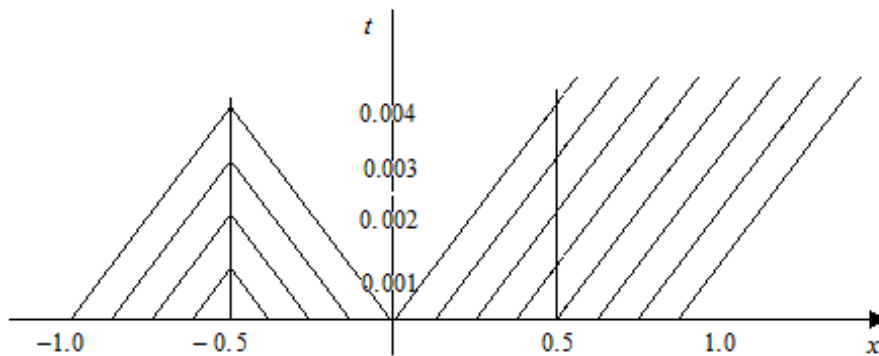


Figura 2.2: Solución débil en 4 intervalos

$$\rho(x, t) = \begin{cases} 0 & x < -\frac{1}{2} \\ \rho_{\text{máx}}(x, t) & -\frac{1}{2} < x \leq -v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t \\ \frac{\rho_{\text{máx}}(x, t)}{2} \left(1 - \frac{x}{v_{\text{máx}}(x, t) t} \right) & -v_{\text{máx}} t < x < v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t \\ 0 & x \geq v_{\text{máx}}(x, t) \cdot t \end{cases}$$

Cuando $v_{\text{máx}} = 120$, $\rho_{\text{máx}} = 140$, $L = 500\text{mt}$ y $t = 1,04$ mín se tiene:

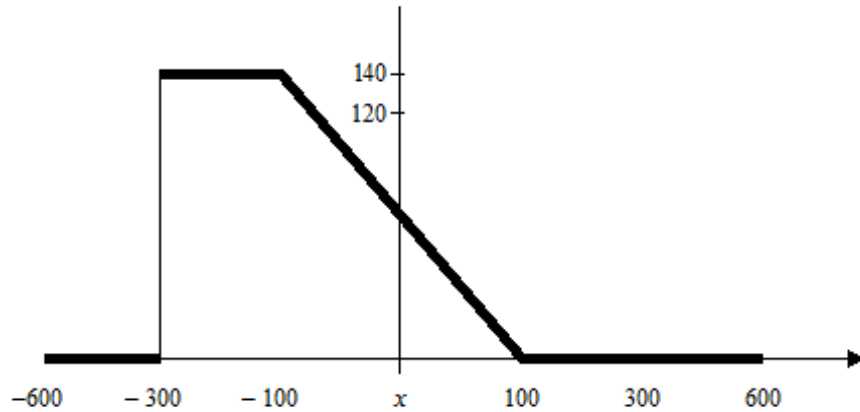


Figura 2.3: Onda de choque

Esta $y(t)$ se llama onda de choque.

Definición 3 Una curva $y(t) = x$ que satisface

$$\frac{dy}{dt} = \frac{f(u_I) - f(u_D)}{u_I - u_D}, \quad (\text{i})$$

$$g(u_D) < \frac{dy}{dt} < g(u_I) \quad (\text{ii})$$

donde, $u_D = \lim_{x \rightarrow y(t)^+} u(x, t)$.

$u_I = \lim_{x \rightarrow y(t)^-} u(x, t)$.

Definición 4 $g(u) = f'(u)$,

se le llama una onda de choque.

Definición 5 Una función u medible y acotada es solución débil o generalizada del problema de Cauchy

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial q(u)}{\partial x} & \quad x \in \mathbb{R}, t > 0 \\ u(x, 0) & = \varphi(x) \end{aligned}$$

si $\frac{d}{dt} \int_a^b u(x, t) dx = f(u(a, t)) - f(u(b, t))$

$u(x, 0) = \varphi(x)$ y la función u es continua por tramos y las únicas discontinuidades se propagan a lo largo de las ondas de choque.

2.2. Resolución numérica de la ecuación de Burgers

Para la resolución numérica utilizaremos una discretización espacio-temporal, y para ello estudiaremos los esquemas de diferencias finitas explícitos más usados en la literatura

Operadores en diferencias finitas ^[2]

Sea f una función real definida en un intervalo $[a, b]$.

Sean $n \in \mathbb{Z}^+$, $\tau(n)$, una partición de $[a, b]$, digamos

$$\tau(n) = \{x_0 = a, x_1, \dots, x_n = b\} \quad x_{i-1} < x_i, \quad i = 1, \dots, n$$

$$h_i = x_i - x_{i-1}, \quad h = \max_{i=1, \dots, n} h_i.$$

Suponemos que $h_i = \frac{(b-a)}{n} = h$, $i = 1, \dots, n$ (partición uniforme).

Se definen los operadores de diferencias finitas siguientes:

Operadores en diferencias finitas de orden 1

Diferencia finita hacia adelante

$$\Delta u(x_i) = u(x_{i+1}) - u(x_i) \quad i = 1, \dots, n-1.$$

Diferencias finita hacia atrás

$$\nabla u(x_i) = u(x_i) - u(x_{i-1}) \quad i = 1, \dots, n.$$

Diferencia finita central

$$\partial u(x_i) = u\left(x + \frac{h}{2}\right) - u\left(x - \frac{h}{2}\right),$$

o también

$$\partial u\left(x_{i+\frac{1}{2}}\right) = u(x_{i+1}) - u(x_i).$$

Diferencias finitas de orden 2

$$\begin{aligned}
\Delta^2 u(x_i) &= u(x_{i+2}) - 2u(x_{i+1}) + u(x_i) & i = 1, \dots, n-2. \\
\nabla^2 u(x_i) &= u(x_{i-2}) - 2u(x_{i-1}) + u(x_i) & i = 1, \dots, n \\
\partial^2 u(x_i) &= u(x_{i+1}) - 2u(x_i) + u(x_{i-1}) & i = 1, \dots, n-1 \\
\Delta \nabla u(x_i) &= u(x_{i+1}) - 2u(x_i) + u(x_{i-1}) & i = 1, \dots, n-1 \\
\nabla \Delta u(x_i) &= u(x_{i+1}) - 2u(x_i) + u(x_{i-1}) & i = 1, \dots, n-1 \\
\Delta \partial u(x_{i+\frac{1}{2}}) &= u(x_{i+2}) - u(x_{i+1}) - u(x_i) + u(x_{i-1}) & i = 1, \dots, n-1
\end{aligned}$$

Observemos como obtener:

$$\Delta^2 u(x_i) = u(x_{i+2}) - 2u(x_{i+1}) + u(x_i) \quad i = 1, \dots, n-2.$$

Veamos.

$$\begin{aligned}
\Delta^2 u(x_i) &= \Delta(\Delta u(x_i)) \\
&= \Delta(u(x_{i+1}) + u(x_i)) \\
&= u(x_{i+2}) - u(x_{i+1}) - (u(x_{i+1}) - u(x_i)) \\
&= u(x_{i+2}) - 2u(x_{i+1}) - u(x_i).
\end{aligned}$$

Luego concluimos

$$\Delta^2 u(x_i) = u(x_{i+2}) - 2u(x_{i+1}) - u(x_i).$$

■ ■ ■

Aproximaciones de $u'(x_i)$ y $u''(x_i)$

Para obtener la aproximaciones aplicamos el desarrollo de Taylor

$$\begin{aligned}
u(x_{i+1}) &= u(x_i + h) = u(x_i) + u'(x_i)h + \frac{1}{2}u''(x_i)h^2 + \frac{1}{\varepsilon}u'''(\xi_i)h^3 \\
u(x_{i-1}) &= u(x_i - h) = u(x_i) - u'(x_i)h + \frac{1}{2}u''(x_i)h^2 - \frac{1}{\varepsilon}u'''(\xi_i)h^3
\end{aligned}$$

Utilizando

$$u(x_{i+1}) = u(x_i + h) = u(x_i) + u'(x_i)h + \frac{1}{2}u''(x_i)h^2 + \frac{1}{\varepsilon}u'''(\xi_i)h^3$$

y

$$u(x_{i-1}) = u(x_i - h) = u(x_i) - u'(x_i)h + \frac{1}{2}u''(x_i)h^2 - \frac{1}{\varepsilon}u'''(\xi_i)h^3$$

se tiene que:

$$\Delta u(x_i) = u(x_{i+1}) - u(x_i)$$

que nos da como resultado,

$$\frac{\Delta u(x_i)}{h} = \frac{u(x_{i+1}) - u(x_i)}{h} = u'(x_i) - \frac{1}{2}u''(x_i)h + \frac{1}{6}u'''(\xi_i)h^2$$

con $\frac{1}{2}|u''(x_i)h| \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0$

lo que que acabamos de obtener significa que:

$$u'(x_i) \simeq \frac{\Delta u(x_i)}{h} = \frac{u(x_{i+1}) - u(x_i)}{h}$$

de lo que concluimos

$$o(h) + u'(x_i) = \frac{\Delta u(x_i)}{h} = \frac{u(x_{i+1}) - u(x_i)}{h}$$

Un procedimiento similar utilizamos para obtener

$$o(h^2) + u''(x_i) = \partial^2 u\left(x_{i+\frac{1}{2}}\right) = \frac{u(x_{i+1}) - u(x_{i-1}))}{2h}.$$

2.2.1. Esquemas de diferencias finitas explícitos ^[6]

Los operadores en diferencias finitas anotados anteriormente nos permiten aproximar la ecuación de primer orden

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} = 0 & -\infty < x < \infty, t > 0 \\ u(x, 0) = \varphi(x) & -\infty < x < \infty \end{cases},$$

donde f es una función lineal continuamente diferenciable, mediante algunos esquemas numéricos. Denotaremos

$$f^j(x_i) = U_i^j.$$

Euler hacia adelante

$$U_i^{j+1} = U_i^j - \frac{c\Delta t}{2h} [U_{i+1}^j - U_{i-1}^j].$$

Lax-Friedrichs

$$U_i^{j+1} = U_i^j - \frac{1}{2} [U_{i+1}^j + U_{i-1}^j] - \frac{c\Delta t}{2h} [U_{i+1}^j - U_{i-1}^j].$$

Upwind

$$U_i^{j+1} = U_i^j - \begin{cases} \frac{c\Delta t}{h} [U_i^j - U_{i-1}^j], & c > 0 \\ \frac{\Delta t}{h} [U_{i+1}^j - U_i^j], & c < 0 \end{cases}$$

Lax-Wendroff

$$U_i^{j+1} = U_i^j - \frac{c\Delta t}{2h} [U_{i+1}^j - U_{i-1}^j] + \frac{c^2(\Delta t)^2}{2h^2} [U_{i+1}^j - 2U_i^j + U_{i-1}^j]$$

2.2.2. Discretización para el modelo LWR ^[6]

Si u es una solución de la ecuación

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} &= 0 & -\infty < x < \infty, t > 0, \\ u(x, 0) &= \varphi(x) & -\infty < x < \infty, \end{aligned}$$

en una región acotada Ω del plano (x, t) entonces por el Teorema de Stokes,

$$\begin{aligned} 0 &= \int \int_{\Omega} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} \right) dx dt = \int \int_{\Omega} \nabla \cdot (f, u) dx dt \\ &= \int_{\partial\Omega} (f dt - u dx), \end{aligned}$$

en el rectángulo

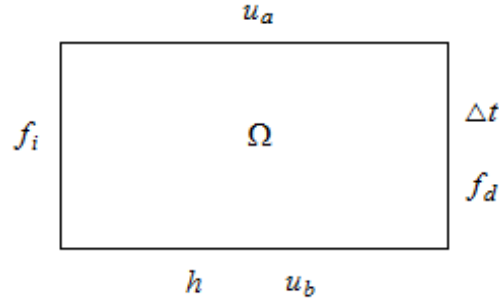


Figura 2.4: Modelo LWR

se tiene que: $\Omega = h \times \Delta t$ y

$$(u_a - u_b) h + (f_d - f_i) \Delta t = 0.$$

Si notamos U_i^j al valor de u en un tiempo j y en el punto medio de la base del rectángulo, se tiene

$$(U_i^{j+1} - U_i^j) h = -\Delta t \left[f_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - f_{i-\frac{1}{2}}^{j-\frac{1}{2}} \right].$$

El método de Lax-Wendroff satisface la relación

$$U_i^{j+1} = U_i^j - \frac{\Delta t}{h} [U_i^j - U_{i-1}^j]$$

En nuestro caso, para

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} = 0 \quad x \in (-\infty, \infty), t > 0,$$

$$u(x, 0) = \begin{cases} 1 & x \leq 0 \\ 1 - x & 0 < x < 1 \\ 0 & x \geq 1 \end{cases},$$

con $f(u) = \frac{u^2}{2}$.

2.2.3. Aplicación de la discretización del modelo LWR a un problema de tráfico vehicular ^[6]

Tenemos un circuito cerrado con un carril de longitud L km en el que no hay entradas ni salidas de vehículos.

Queremos determinar el comportamiento de la densidad a lo largo del tiempo, si usamos el modelo Lighthill-Whitham el problema a resolver es el siguiente

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(\rho(x,t))}{\partial x} = 0 & , 0 < x < L, t > 0, \\ \rho(x, 0) = \rho_e 1 & 0 < x < L, \\ \rho(0, t) = \rho(L, t) & t > 0, \end{cases}$$

con $q(\rho(x, t)) = \rho V_0(\rho(x, t))$

$$V_e(\rho(x, t)) = \rho_{\text{máx}}(x, t) \left(1 - \frac{\rho(x, t)}{\rho_{\text{máx}}(x, t)} \right) \text{ la aproximación de Greenshields.}$$

Utilizando el esquema de Lax-Wendroff , para $n, m \in N$ tenemos que

$$\begin{aligned} h &= \frac{L}{n}, \\ \Delta t &= \frac{T}{m}, \end{aligned}$$

y definimos

$$\begin{aligned} x_i &= ih & i = 1, \dots, n \\ t_j &= j\Delta t & j = 1, \dots, m. \end{aligned}$$

La aproximación de $\rho(x_i, t_j)$ es ρ_i^j

$$\rho_i^0 = \rho(x_i, 0) \quad i = 1, \dots, n$$

$$\rho_0^j = \rho_n^j \quad j = 1, \dots, m.$$

Para obtener ρ_i^j se utiliza

$$\begin{aligned} \rho_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}(x, t) &= \frac{1}{2} (\rho_i^j(x, t) + \rho_{i+1}^j(x, t)) - \frac{\Delta t}{2h} (q(\rho_{i+1}^j(x, t)) - q(\rho_{i-1}^j(x, t))) \\ \rho_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}(x, t) &= \frac{1}{2} (\rho_i^j(x, t) + \rho_{i-1}^j(x, t)) - \frac{\Delta t}{2h} (q(\rho_i^j(x, t)) - q(\rho_{i-1}^j(x, t))) \\ \rho_i^{j+1}(x, t) &= \rho_i^j(x, t) - \frac{\Delta t}{h} \left(q\left(\rho_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}(x, t)\right) - q\left(\rho_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}(x, t)\right) \right). \end{aligned}$$

2.2.4. Modelización macroscópica heterogénea de la ecuación de Burgers ^[3]

En el caso de un circuito de dos carriles que contempla dos clases de flujo, el flujo de vehículos pesados y el flujo de vehículos livianos, la modelación heterogénea descompone los tráficos heterogéneos en subclases homogéneas.

Principios de heterogeneidad en los modelos de primer orden ^[3]

El flujo de tráfico global se descompone en subclases homogéneas.

Luego, la modelización del flujo global en sus subclases es similar a la del flujo global homogéneo.

De esta manera, el principio de conservación de vehículos se aplica a las subclases.

El flujo parcial $q_i(x, t)$ en cada sub-clase de vehículos está definida por:

$$q_i(x, t) = \rho_i(x, t) v_i(x, t),$$

y cada clase tiene su velocidad v_i definida por un diagrama fundamental, lo que nos permite seguir hablando del modelo macroscópico de primer orden.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho_i(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q_i(x, t)}{\partial x} = 0 \\ q_i(x, t) = \rho_i(x, t) v_i(x, t) \end{array} \right. \quad i = 1, \dots, n$$

$$v_i = v_i(\rho_1(x, t), \rho_2(x, t), \dots, \rho_n(x, t))$$

Entonces, el sistema que se debe resolver es un sistema de n leyes de conservación, que tiene la siguiente forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + F(\rho) \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = 0 \\ F(\rho) = (F(\rho))_{ij} = \frac{\partial q_i}{\partial \rho_j} \end{array} \right. .$$

Cuando el diagrama fundamental es igual para todas las sub clases y donde la velocidad depende de la densidad total de los vehículos, el flujo no se modifica con respecto al flujo global homogéneo.

Sin embargo, en el caso heterogéneo hay una interacción entre las sub-clases, luego existe una modificación del flujo con respecto al flujo homogéneo.

Principios de heterogeneidad aplicado al modelo de primer orden LWR ^[3]

Desarrollaremos un modelo multiclases del modelo de primer orden LWR.

Para la formulación del modelo LWR multi-clase suponemos el tráfico sobre un tramo de autopista de características fijas.

El flujo de tráfico está formado de dos flujos, uno de vehículos livianos y otro de vehículos pesados, distinguiremos los unos de los otros ppor 1 y 2 respectivamente.

Para las dos clases de vehículos, están definidas densidades $\rho_i(x, t)$:

$\rho_1(x, t)$ densidad para vehículos livianos.

$\rho_2(x, t)$ densidad para vehículos pesados.

flujos $q_i(x, t)$:

$q_1(x, t)$ flujo de vehículos livianos.

$q_2(x, t)$ flujo de vehículos pesados.

velocidades medias $v_i(x, t)$:

$v_1(x, t)$ velocidad media para vehículos livianos.

$v_2(x, t)$ velocidad media para vehículos pesados.

Para la densidad total $\rho(x, t)$, el flujo total $q(x, t)$ y la velocidad media total $v(x, t)$, para el conjunto de las dos clases de vehículos, se aplican:

$$\begin{aligned}\rho(x, t) &= \sum \rho_i(x, t) \\ q(x, t) &= \sum q_i(x, t) \\ v(x, t) &= \frac{q(x, t)}{\rho(x, t)} = \sum \left(\frac{\rho_i(x, t)}{\rho(x, t)} \right) v_i(x, t).\end{aligned}$$

Para esta definición de velocidad media de los flujos de las dos clases de vehículos, la relación

$$q(x, t) = \rho(x, t) v(x, t).$$

Se aplica para cada clase y para el flujo total.

La ley de conservación del tráfico, que es la base del modelo LWR, se aplica a cada clase i y al flujo total.

$$\frac{\partial \rho_i(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q_i(x, t)}{\partial x} = 0.$$

En el modelo LWR, el flujo de equilibrio es función de todas las densidades de las clases de vehículos

$$q_i(x, t) = q_{e_i}(\rho_1(x, t), \rho_2(x, t)).$$

Resolución analítica para un modelo macroscópico heterogéneo con $n = 2$ ^[3]

El modelo de flujo de tráfico homogéneo LWR está construido en base a la ecuación escalar de conservación. Su resolución analítica esta basada sobre el método de características.

Pero cuando analizamos el modelo de flujo de tráfico heterogéneo que esta constituido por un sistema de 2 ecuaciones de conservación obtenidas por la introducción de las relaciones de equilibrio en la ecuación de conservación, para la resolución analítica se necesita teoría de sistemas hiperbólicos de ecuaciones

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + q'_e(x, t) \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = 0$$

$$\text{con } \vec{\rho}(x, t) = \begin{bmatrix} \rho_1(x, t) \\ \rho_2(x, t) \end{bmatrix}$$

$$q'_e(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_{e1}}{\partial \rho_1} & \frac{\partial q_{e1}}{\partial \rho_2} \\ \frac{\partial q_{e2}}{\partial \rho_1} & \frac{\partial q_{e2}}{\partial \rho_2} \end{bmatrix}.$$

Capítulo 3

Método de factores de ajuste para flujos saturados

3.1. Flujo de saturación

Se define el flujo de saturación como "el máximo volumen de tráfico que puede entrar en una intersección semaforizada por un acceso si el semafor esta en verde" [HCM (Highway Capacity Manual)], y se expresa en vehículos por acceso por hora de verde.

En nuestro medio el cálculo del flujo de saturación se basa en la metodología propuesta por [HCM (Highway Capacity Manual)]

3.2. Cálculo del flujo vehicular ^[19]

Se utilizará el método de factores de ajuste que nos proporciona el Highway Capacity Manual (HCM)¹

El método calcula el flujo vehicular de saturación en condiciones ideales, aplicando factores de ajuste, los que pretenden representar las condiciones reales que se tienen en la autopista.

El flujo de saturación en condiciones ideales es 1900 vehículos/hora de acuerdo al HCM.

Los factores de ajuste utilizados forman parte de la siguiente ecuación:

$$S_i = S_0 N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb}$$

donde:

S_i es la intensidad o flujo de saturación para el grupo de carriles.

S_0 es el flujo de saturación ideal.

N es el número de carriles por grupo.

f_w es el factor de ajuste por ancho de carril.

¹Highway Capacity Manual (HCM), Capítulo 16, 2000.

f_{HV} es factor de ajuste para vehículos pesados.

f_g es el factor de ajuste debido a pendiente.

f_p es el factor de ajuste debido a estacionamiento en carril.

f_{bb} es el factor de ajuste debido al bloqueo de buses en paradas.

f_a es el factor de ajuste según el tipo de área.

f_{LU} es el factor de ajuste por utilización de carril.

f_{LT} es el factor de ajuste debido a giros izquierdos.

f_{RT} es el factor de ajuste debido a giros derechos.

f_{Lpb} es el factor de ajuste por peatones en giro izquierdo.

f_{Rpb} es el factor de ajuste por peatones en giro derecho.

Descripción de los factores de ajuste

3.2.1. Factor de ajuste por ancho de carril (f_w)

El ancho de carriles es por lo general de 3,6 m.

Para carriles con ancho mayor a 4,8 m se puede calcular el factor de ajuste.

Para carriles con ancho menor a 2,4 m no se debe calcular el factor de ajuste.

La fórmula para el factor de ajuste es:

$$f_w = 1 + \frac{(w - 3,6)}{9}$$

donde w es el ancho de carril.

3.2.2. Factor de ajuste para vehículos pesados (f_{HV})

Son considerados como vehículos pesados aquellos que tienen más de cuatro neumáticos. Este factor se debe al espacio y la diferencia que existe entre las capacidades de vehículos livianos y vehículos pesados.

La fórmula para este factor de ajuste es:

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV (E_T - 1)}$$

donde: $\%HV$ es el porcentaje de vehículos pesados.

E_T es $2 pc/HV$

3.2.3. Factor de ajuste debido a la pendiente (f_g)

Este factor se aplica al tener en cuenta que los vehículos pesados y livianos son afectados por la pendiente de la vía de distinta forma.

La fórmula para el factor de ajuste es:

$$f_g = 1 - \frac{\%G}{200}$$

donde: $\%G$ es el grado de la pendiente, y debe fluctuar entre:

$$-6 \leq \%G \leq 10.$$

3.2.4. Factor de ajuste debido al estacionamiento en carril (f_p)

Se debe a que se tiene en cuenta que el estacionamiento de vehículos produce un efecto de fricción en el flujo vehicular. En promedio se tiene que cada maniobra de estacionamiento bloquea el tráfico por 18 s.

La fórmula para esta factor es:

$$f_p = \frac{N - 0,1 - \frac{18Nm}{3600}}{N},$$

donde: N es el número de carriles de un grupo .

Nm es el número de maniobras de estacionamiento por hora.

$$\begin{aligned} 0 &\geq Nm \geq 1800. \\ t_p &\geq 0,050 \end{aligned}$$

$t_p = 1$ cuando no hay estacionamiento.

3.2.5. Factor de ajuste al bloque de buses en paradas (f_{bb})

Este factor determina el efecto de las paradas de buses. Solo debe aplicarse cuando a causa de las paradas se produce una disminución en el flujo vehicular.

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14,4Nb}{3600}}{N},$$

donde: N es el número de carriles en el grupo.

N_B es el número de buses que paran por hora.

$$\begin{aligned} 0 &\leq N_B \leq 250 \\ t_{bb} &\geq 0,050 \end{aligned}$$

3.2.6. Factor de ajuste según el tipo de área (f_a)

Este factor se calcula en áreas con características de una zona comercial central (*CBD*), como son: carril reducido estrecho, maniobras de estacionamiento, taxis y buses que bloquean el flujo de vehículos, gran actividad peatonal.

Cuando es un área tipo *CBD*, el factor de ajuste es $f_a = 0,900$, en caso contrario $f_a = 1$.

3.2.7. Factor de ajuste por utilización de carril (f_{LU})

Se calcula a causa de la distribución no homogénea del tráfico entre los carriles de un grupo.

Está dado por la siguiente fórmula:

$$f_{LU} = \frac{V_g}{V_{g1}N},$$

donde: V_g es el porcentaje de flujo de demanda por grupo (en vehículos/hora).

V_{g1} es el porcentaje de flujo de demanda en un solo carril (en vehículos hora).

N es el número de carriles en el grupo.

Un factor de ajuste por utilización de carril usado generalmente cuando el flujo vehicular es uniforme es 1,0.

3.2.8. Factor de ajuste debido a giros izquierdos (f_{LT})

Este factor refleja el impacto de peatones y bicicletas que usan el paso para peatones y producen una disminución en la velocidad de los vehículos que giran.

Este factor depende de:

1. Que el giro a la izquierda sea de un carril exclusivo o compartido.
2. Tipo de paso (protegido, permitido o protegido más permitido).
3. cuantos vehículos giran a la izquierda en carriles compartidos. Este factor es 1,0 se el grupo de carriles no incluye ningún giro a la izquierda.
4. El porcentaje de flujo contrario cuando se permiten los giros izquierdos.

La fórmula para este factor de ajuste es:

$$f_{LT} = \frac{1}{1,0 + 0,5P_{LT}} \text{ y } f_{LT} = 0,95 \text{ para carril exclusivo.}$$

P_{LT} es porcentaje de giros a la izquierda.

3.2.9. Factor de ajuste debido a giros derecho (f_{RT})

Al igual que el factor de ajuste debido a giros izquierdos se debe a la obstaculización que producen peatones y bicicletas en el tráfico.

Este factor depende de:

- que si los giros a la derecha son en un carril exclusivo o compartido,
- el número de vehículos que giran a la derecha de los carriles compartidos.

El factor de ajuste es 1,0 si el grupo de carriles no incluye giros a la derecha.

La fórmula para este factor es:

$$f_{RT} = 0,85 \text{ para carril exclusivo.}$$

$$f_{RT} = 1,0 - (0,15) P_{RT} \text{ para carril compartido.}$$

$$f_{RT} = 1,0 - (0,135) P_{RT} \text{ para un solo carril,}$$

donde: P_{RT} es el porcentaje de giros a la derecha.

3.2.10. Factor de ajuste por peatones en giros izquierdo (F_{Lpb}) y derecho (f_{Rpb})

Tienen en consideración las fases de semáforos durante la que se realizan los giros, números de peatones que utilizan los pasos de peatones, porcentaje de vehículos que giran.

Cuando el flujo es uniforme y no hay peatones ni bicicletas, los factores son evaluados como 1.

Capítulo 4

Estimación de la velocidad vehicular

Generalmente los datos de tráfico vehicular no se encuentran siempre a disposición, ni en todos los lugares que se requiere, luego; para calcular variables de tráfico vehicular es posible hacer uso de estimaciones que se obtienen a partir de datos disponibles. Es uno de los objetivos de este trabajo estimar la velocidad vehicular.

4.1. Modelo de transmisión por celdas (secciones) [16]

Teniendo en cuenta que el tramo de autopista examinado se supone el flujo q , la densidad p y la velocidad v como funciones continuas que dependen del tiempo y la posición, es posible discretizar la densidad y la velocidad de tal manera que el comportamiento vehicular se actualice cada incremento de tiempo Δt para una cantidad i de secciones de longitud L_i , en las que se ha dividido el tramo de autopista.

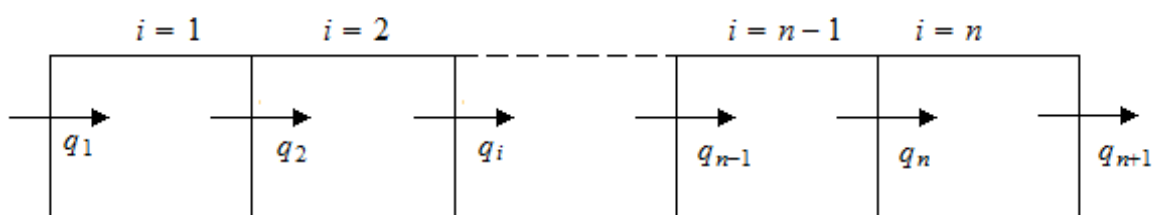


Figura 4.1: Tramo de autopista dividida en secciones

$$i \in I \subset \mathbb{N}, \quad I \text{ finito.}$$

El modelo de transmisión por Celdas o CTM (Cell Transmission Model) que fue propuesto por Daganzo [5] analiza el tráfico de la siguiente manera:

- cuando existe flujo libre, los vehículos se desplazan a la velocidad máxima permitida, y el flujo se calcula como

$$q = \rho v,$$

donde v es constante.

- cuando existe flujo congestionado, la densidad aumenta y la velocidad disminuye, luego el flujo puede calcularse como:

$$q = (\rho_{\text{máx}} - \rho) w$$

donde $\rho_{\text{máx}}$ es la densidad máxima de la autopista y w velocidad de flujo congestionado.

Un análisis más detallado de este modelo lo podemos encontrar en [17].

4.2. Modelo de Modos Conmutados [17]

El Modelo de Modos Conmutados o SMM (Switching-Mode Model) requiere que el número de secciones consecutivas en las que se divide el tramo de autopista sea pequeño. adicionalmente considera un flujo del mismo tipo en todas las secciones,

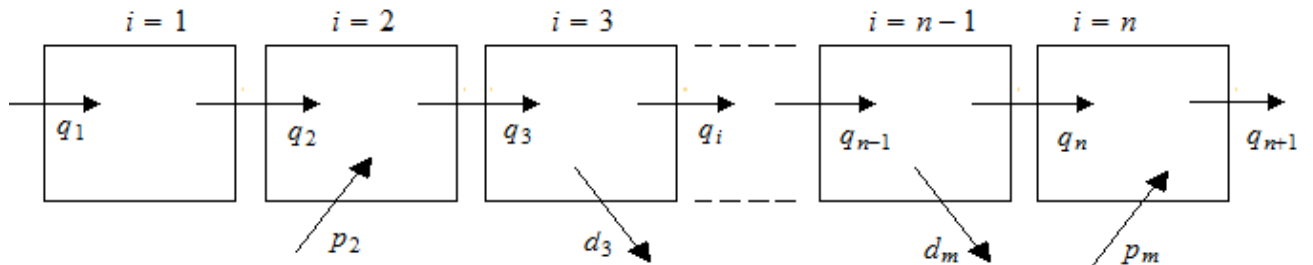


Figura 4.2: Esquema de división SMM

p_2 y p_m flujos de entrada por rampas
 d_3 y d_m flujos de salida por rampas.

Un sistema formado de i secciones, en flujo libre puede ser representado como

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{v_1}{L_1} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{v_1}{L_1} & -\frac{v_2}{L_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -\frac{v_i}{L_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdots & \frac{1}{L_m} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ r_1 \\ \vdots \\ r_m \end{bmatrix} \quad [1]$$

donde, q_i flujo de entrada en la sección $i = 1$

r_1, \dots, r_m flujo de entrada y salida por las rampas a cada sección.

La ecuación [1] se la conoce con el nombre de Modelo de Modos Conmutados ó SMM que es una modificación del CTM de Daganzo [4].

4.3. Esquema de estimación simultánea de densidad y velocidad ^[17]

Este esquema se basa en SMM para un tramo de autopista dividido en un número pequeño de secciones, y supone que las densidades y velocidades de tráfico son diferentes en cada sección de autopista. En este esquema solo se necesita las mediciones de flujo para realizar los cálculos, luego cada sección tiene un flujo distinto del de las otras secciones.

4.3.1. Modelo de flujo libre

La formulación del modelo es aplicada a un tramo de la Autopista General Rumiñahui dividida en 5 secciones, de dos carriles en un solo sentido, en el que se ha medido el flujo vehicular.

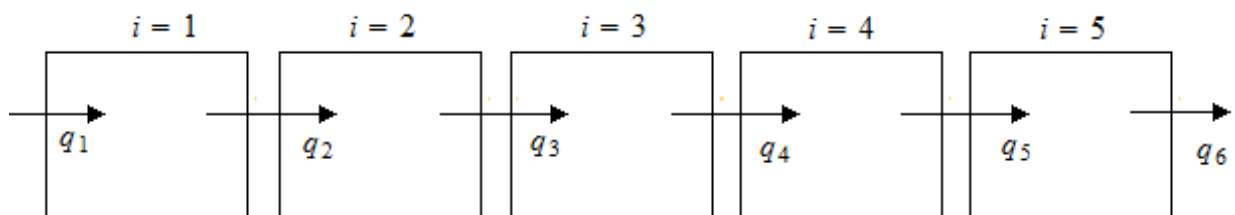


Figura 4.3: Tramo de autopista dividida en 5 secciones

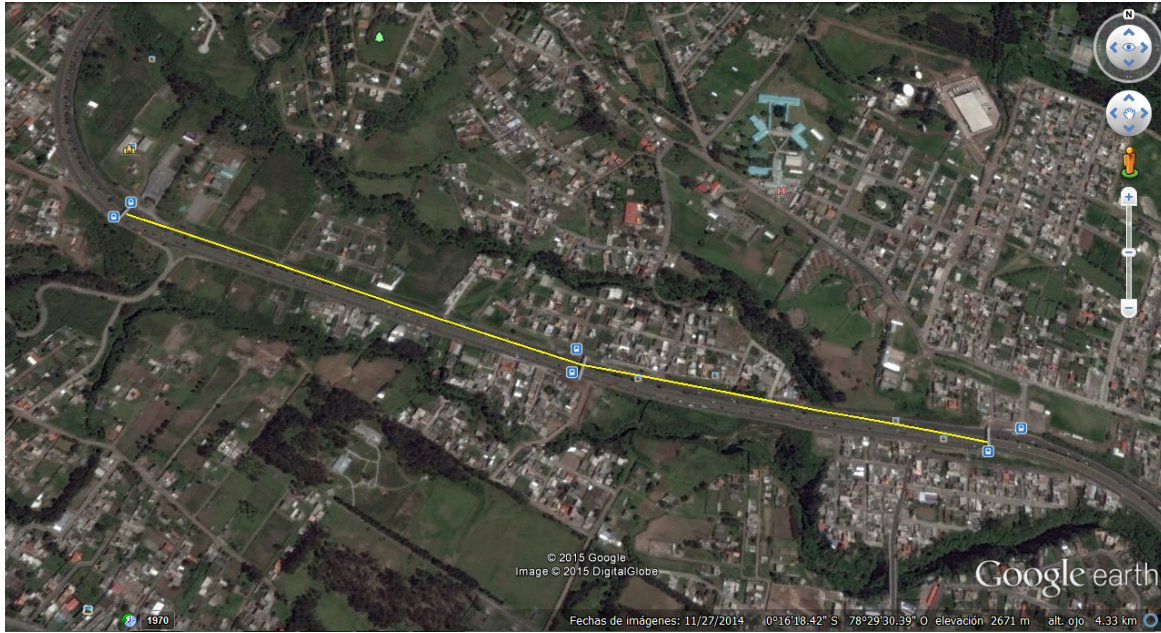


Figura 4.4: Autopista General Rumiñahui (puente 5 a puente 7)

Suponiendo que todas las secciones tienen una densidad por debajo de la densidad crítica p_0 , podemos describirlo así:

$$\begin{aligned}\dot{\rho} &= L^{-1}FV\rho + Bu = A(v)\rho + Bu \\ q &= C(v)\rho\end{aligned}$$

donde,

$$\begin{aligned}\rho &= [p_1, \dots, p_5]^T && \text{vector de densidades.} \\ v &= [v_1, \dots, v_5]^T && \text{vector de velocidades (con estructura diagonal).}\end{aligned}$$

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_5} \end{bmatrix}$$

$$u = [q_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C(v) = [0 \ \dots \ 0 \ v_5]$$

$$F = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De lo anterior resulta

$$\dot{p} = L^{-1} F V \rho + B u$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \\ \dot{p}_3 \\ \dot{p}_4 \\ \dot{p}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Realizando operaciones obtenemos

$$\dot{p} = A(v) \rho + B u$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \\ \dot{p}_3 \\ \dot{p}_4 \\ \dot{p}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_4} & -\frac{1}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_5} & -\frac{1}{L_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

y para:

$$q = C(v) \rho$$

$$q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & v_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix}$$

Resumiendo tenemos:

$$\begin{cases} \dot{p} = A(v) \rho + Bu \\ q = C(v) \rho \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \\ \dot{p}_3 \\ \dot{p}_4 \\ \dot{p}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_4} & -\frac{1}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_5} & -\frac{1}{L_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ q_5 = v_5 p_5 \end{array} \right.$$

gracias a la estructura diagonal de V se tiene:

$$\begin{aligned} A(v) \rho &= A(\rho) v \\ C(v) \rho &= C(\rho) v \end{aligned}$$

y se asume que la densidad p y la velocidad v no son medidas, y solo se tienen datos de flujo en cada sección.

Lo anterior nos permite estimar las velocidades en cada sección.

Para la velocidad temporal de la densidad se aplicó el principio de conservación de vehiculos [17]

$$\dot{\rho} = \frac{1}{L_i} (q_i - q_{i+1} + r_i - d_i)$$

donde , r_i y d_i son flujos de entrada y salida por rampas a cada sección.

Capítulo 5

Simulación y análisis de errores

5.1. Noción de algoritmo

Cuando tenemos un problema que puede ser resuelto analíticamente, también podemos resolverlo a través del análisis numérico, mediante un procedimiento que nos permite aproximar la solución del problema.

Definición 6 *Se llama algoritmo a una sucesión finita de operaciones elementales que describan como calcular la solución de un problema de modo eficaz con datos de entrada dados.*

5.2. Algoritmos y programas

Para resolver por métodos numéricos un problema es necesario que se cumpla lo siguiente:

- 1) Que el problema tenga una solución.
- 2) Formular un esquema numérico que aproxime la solución del problema.
- 3) La construcción del un algoritmo para el esquema numérico.
- 4) Obtener de un programa informático que nos permita calcular la solución aproximada del problema.

El algoritmo del esquema numérico utilizado debe tener:

1. Datos de entrada.
2. Algoritmo o procedimiento.
3. Datos de salida.

5.3. Tipos de errores

Puesto que la exactitud de los resultados es un aspecto importante que debe ser considerado cuando se utilizan esquemas numéricos para obtener la solución de un problema. Abordaremos ahora este tema.

Entre los tipos de errores que afectan la exactitud tenemos:

5.3.1. Errores en los datos de entrada o errores inherentes

Se deben al esquema numérico utilizado y además a los errores que se producen cuando se toman las medidas experimentales.

5.3.2. Errores de redondeo

Estos errores se deben a que los instrumentos de cálculo aproximan las cantidades.

5.3.3. Errores de aproximación

Errores de truncamiento

Si calculamos la solución de un problema mediante series numéricas convergentes, como $S = \sum_{n=0}^{\infty} a_n$, la aproximación de la solución está dada por $S = \sum_{n=0}^{\infty} a_n$ que tiene un número finito de términos lo cual produce un error de truncamiento.

Errores de discretización

Los errores de discretización se deben al esquema numérico, podemos ver un mejor análisis de los errores de discretización en el anexo C.

5.4. Error de truncamiento para la ecuación de advección ^[7]

Cuando se discretiza las derivadas se introduce un error que se puede estimar a través de una serie de Taylor.

Así se tiene que:

$$\begin{aligned}
 u(x_i, t_{j+1}) &= u(x_i, t_j) + \Delta t \frac{\partial u(x_i, t_j)}{\partial t} + \frac{(\Delta t)^2}{2} \frac{\partial^2 u(x_i, t_j)}{\partial t^2} + \dots \\
 u(x_{i-1}, t_j) &= u(x_i, t_j) - h \frac{\partial u(x_i, t_j)}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 u(x_i, t_j)}{\partial x^2} + \dots
 \end{aligned}$$

si sustituimos u en la solución numérica de la ecuación

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} = 0 \quad -\infty < x < \infty, t > 0$$

$$u(x, 0) = \varphi(x) \quad -\infty < x < \infty$$

es decir en:

$$U_i^{j+1} = U_i^j - \frac{\Delta t}{h} [U_i^j - U_{i-1}^j]$$

obtenemos

$$\frac{u(x_i, t_{j+1}) - u(x_i, t_j)}{\Delta t} + \frac{u(x_i, t_j) - u(x_{i-1}, t_j)}{h} = \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial^2 u(x_i, t_j)}{\partial t^2} + \frac{h}{2} \frac{\partial^2 u(x_i, t_j)}{\partial x^2} + \dots$$

y el error de truncamiento en (x_i, t_j) es

$$E_T^{i,j} \approx \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial^2 u(x_i, t_j)}{\partial t^2} + \frac{h}{2} \frac{\partial^2 u(x_i, t_j)}{\partial x^2} + \dots$$

cuyo valor absoluto es:

$$|E_T^{i,j}| \leq Ch + D\Delta t.$$

Para analizar la estabilidad y consistencia de los esquemas numéricos tengamos en cuenta las siguientes definiciones y teoremas.

Definición 7 Se dice que un método de diferencias finitas es de **orden p** si existen constantes C y D mayores que cero que satisfacen que el error de truncamiento para cualquier punto (x_i, t_i) de la discretización. [7]

$$|E_T^{i,j}| \leq C(\Delta t)^r + Dh^q \quad \text{con } p = \min(r, q).$$

Definición 8 Se dice que un método de diferencias finitas es **constante** si, para cualquier discretización, el valor absoluto del error de truncamiento [7]

$$|E_T^{i,j}| \quad \text{tiende a cero.}$$

El esquema:

$$U_i^{j+1} = U_i^j - \frac{\Delta t}{h} [U_i^j - U_{i-1}^j]$$

es consistente y de orden uno.

Condición CFL

La condición CFL son condiciones necesarias que un esquema en diferencias finitas debe cumplir para converger a la solución del problema

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = 0 \quad -\infty < x < \infty, t > 0$$

$$u(x,0) = \varphi(x) \quad -\infty < x < \infty.$$

con $j = 1, \dots, M$, B matriz $\mathbb{R}^{s \times s}$ y donde $\vec{F}^j \in \mathbb{R}^s$, $s \leq N$, es las condiciones de frontera y el término independiente de \vec{U}_j .

Definición 9 Sean \vec{U}^j y \vec{V}^j dos soluciones del esquema numérico

$$\vec{U}^{j+1} = B\vec{U}^j + \vec{F}^j$$

aplicado a un problema de evolución con condiciones de frontera iguales, pero con condiciones iniciales distintas \vec{U}^0 y \vec{V}^0 . Se dice que un método de **diferencias finitas** es estable si existe una constante $k > 0$, independiente de Δt y h , tal que para alguna norma vectorial [7]

$$\|\vec{V}^j - \vec{U}^j\| \leq k \|\vec{V}^0 - \vec{U}^0\|, \quad j\Delta t \leq T$$

Teorema 10 Supongamos que se tiene un problema de evolución lineal y un esquema numérico de la forma

$$\vec{U}^{j+1} = B\vec{U}^j + \vec{F}^j$$

y que existe una $k > 0$ tal que

$$\|B^j\| \leq k \quad \text{con } j\Delta t \leq T$$

para alguna norma matricial inducida por una norma vectorial, entonces el esquema numérico es estable para problemas lineales. [7]

Teorema 11 (Condición CFL) Si el dominio de dependencia de la solución u en el punto (x_i, t_j) no está dentro de la región de dependencia de U_i^j entonces el esquema de diferencia finitas que generó a U_i^j no es convergente. [7]

Teorema 12 Los métodos explícitos de Euler hacia adelante, Lax-Friedrichs, Upwind y Lax-Wendroff satisfacen la condición CFL siempre que [7]

$$\frac{|c| \Delta t}{h} \leq 1$$

Definición 13 Dado el problema

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = 0$$

$$u(x, 0) = \varphi(x)$$

y su esquema numérico, diremos que **la solución numérica converge a la solución del problema** si E^j tiende a cero cuando Δt y h tienden a cero

$$j\Delta t \rightarrow t \quad \text{con } t \in [0, T]$$

si se tiene un esquema numérico explícito

$$\vec{U}^{j+1} = B\vec{U}^j + \vec{F}^j$$

Teorema 14 (Teorema de Lax) Para un problema de evolución bien planteado y un método numérico consistente del tipo

$$\vec{U}^{j+1} = B\vec{U}^j + \vec{F}^j$$

una condición necesaria y suficiente para que haya convergencia del método es que éste sea estable. [7]

Su $u(x, t)$ es la solución del problema

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = 0 \quad -\infty < x < \infty, t > 0$$

$$u(x, 0) = \varphi(x) \quad -\infty < x < \infty$$

y \vec{U}^j es una aproximación del tipo

$$\vec{U}^{j+1} = B\vec{U}^j + \vec{F}^j$$

se tiene que el error de truncamiento en t_j es \vec{E}_T^j con

$$\left(\vec{E}_T^j\right)_i = \vec{E}_T^{i,j}$$

y gracias a que $\vec{U}^{j+1} = B\vec{U}^j + \vec{F}^j$ es consistente, se tiene que $\exists p, q > 0$,

$$\left\|\vec{E}_T^j\right\| \leq C |(\Delta t)^p + h^q|.$$

Luego,

$$\left\|\vec{U}^j - \vec{u}^j\right\| \leq k \sum_{i=1}^j \left\|\vec{E}_T^i\right\|$$

como $\left\|\vec{E}_T^j\right\| \rightarrow 0$ cuando $\Delta t \rightarrow 0$ y $h \rightarrow 0$, entonces

$$\left\|\vec{U}^j - \vec{u}^j\right\| \rightarrow 0$$

se tiene convergencia.

5.5. Errores de truncamiento para métodos explícitos [7]

Teorema 15 *Todos los métodos explícitos consistentes de un paso son estables si satisfacen la condición CFL.*

Para los esquemas de diferencias finitos explícitos anotados anteriormente se tiene que los errores de truncamiento son:

$$\text{Euler hacia adelante} \quad |E_T^{i,j}| \leq c\Delta t + Dh^2$$

$$\text{Lax-friedrichs} \quad |E_T^{i,j}| \leq c\Delta t + Dh^2$$

$$\text{Upwind} \quad |E_T^{i,j}| \leq c\Delta t + Dh$$

$$\text{Lax-wendroff} \quad |E_T^{i,j}| \leq c(\Delta t)^2 + Dh^2$$

Gracias a los teoremas anotados anteriormente concluimos que los esquemas de diferencias finitas explícitos deben ser consistentes y deben cumplir con la condición CFL, para ser convergentes.

5.6. Algoritmo para la estimación de velocidades en la sección del tramo de la Autopista General Rumiñahui comprendido entre el puente 5 y puente 7

```
Option Explicit
Dim matrizL(5, 5) As Double
Dim matrizF(5, 5) As Double
Dim matrizDensidad(5, 5) As Double
Dim matrizCondicionesFrontera(5, 5) As Double
Dim matrizL_F(5, 5) As Double
Dim matVecCondicionesFrontera(5) As Double

Dim vectorL(5) As Double
Dim vectorq1(6) As Double
Dim vectorVelocidad(5) As Double
Dim vectorDensidad(5) As Double
Dim vectorDensidadEstimada(5) As Double
Dim vectorCondicionesFrontera(5) As Double
Dim sumaMatriz As Double
Dim cGauss As Double
Dim velocidadPermitida As Double
Dim vectorVelocidadFinal(5) As Double
Dim matrizVelocidad(5) As Double
Dim i, j, k As Integer
Dim flujoMaximo As Double

Dim suma As Double
```

```
Private Sub BtnProcesar_Click()

    vectorL(0) = TxtL1.Text
    vectorL(1) = TxtL2.Text
    vectorL(2) = TxtL3.Text
    vectorL(3) = TxtL4.Text
    vectorL(4) = TxtL5.Text

    vectorq1(0) = Txtq11.Text
    vectorq1(1) = Txtq21.Text
    vectorq1(2) = Txtq31.Text
    vectorq1(3) = Txtq41.Text
```

5.6. ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES EN LAS SECCIÓN DEL TRAMO I

```

vectorq1(4) = Txtq51.Text
vectorq1(5) = Txtq61.Text

velocidadPermitida = TxtV11.Text

flujoMaximo = vectorq1(0)
For i = 1 To 4
    If vectorq1(i) > flujoMaximo Then
        flujoMaximo = vectorq1(i)
    End If
Next i

For i = 0 To 4
    vectorDensidad(i) = flujoMaximo / velocidadPermitida * vectorq1(i) / velocidadPermitida
Next i

' Matriz L
For i = 0 To 4
    For j = 0 To 4
        If i <> j Then
            matrizL(i, j) = 0
        Else
            matrizL(i, i) = 1 / vectorL(i)
        End If
    Next j
Next i

' Matriz F
For i = 0 To 4
    For j = 0 To 4
        If i <> j Then
            If i = j + 1 Then
                matrizF(i, j) = 1
            End If
        End If
    Next j
Next i

```

```

        Else
            matrizF(i, j) = 0
        End If
    Else
        matrizF(i, j) = -1
    End If
Next j
Next i

' vectorflujoFinalDatos
k = 0
' matriz densidad que ahora son densidades que no entran como datos
For i = 0 To 4
    For j = 0 To 4
        If i <> j Then
            matrizDensidad(i, j) = 0
        Else
            matrizDensidad(i, j) = vectorDensidad(i)
        End If
    Next j
Next i

' Matriz Condiciones de Frontera
For i = 0 To 4
    For j = 0 To 4
        matrizCondicionesFrontera(i, j) = 0
    Next j
Next i

matrizCondicionesFrontera(0, 0) = 1 / vectorL(0)

' Vector Condiciones de Frontera
For i = 0 To 4
    vectorCondicionesFrontera(i) = 0

```

```

Next i

vectorCondicionesFrontera(0) = vectorql(0)

'Multiplicacion de matrices L * F
For i = 0 To 4
  For j = 0 To 4
    sumaMatriz = 0
    For k = 0 To 4
      sumaMatriz = sumaMatriz + matrizL(i, k) * matrizF(k, j)
    Next k
    matrizL_F(i, j) = sumaMatriz
  Next j
Next i

'Multiplicacion de la matriz de Condiciones de frontera y el vector de condiciones de frontera
For i = 0 To 4
  For j = 0 To 4
    matVecCondicionesFrontera(i) = matVecCondicionesFrontera(i)
    + matrizCondicionesFrontera(i, j) * vectorCondicionesFrontera(j)
  Next j
Next i

' Vector de densidad estimada
' afv
For i = 0 To 4
  vectorDensidadEstimada(i) = (1 / vectorL(i)) * (vectorql(i) - vectorql(i + 1))
Next i
vectorDensidadEstimada(0) = vectorDensidadEstimada(0) - matVecCondicionesFrontera(0)

' Matriz inversa de matrizL_F
For k = 0 To 3
  For i = k + 1 To 4
    cGauss = matrizL_F(i, k) / matrizL_F(k, k)
    For j = k + 1 To 4
      matrizL_F(i, j) = matrizL_F(i, j) - cGauss * matrizL_F(k, j)
    Next j
  Next i

  vectorDensidadEstimada(i) = -cGauss * vectorDensidadEstimada(k) + vectorDensidadEstimada(i)

Next i
Next k
'Sustitucion hacia atras para encontrar las velocidades
vectorVelocidad(4) = vectorDensidadEstimada(4) / matrizL_F(4, 4)
For i = 3 To 0 Step -1
  suma = 0
  For j = i + 1 To 4
    suma = suma + (matrizL_F(i, j) * vectorVelocidad(j))
  Next j
  vectorVelocidad(i) = (vectorDensidadEstimada(i) - suma) / matrizL_F(i, i)

Next i

' Matriz inversa de matrizL_F
For i = 0 To 4
  vectorVelocidadFinal(i) = vectorVelocidad(i) / vectorDensidad(i)
Next i

List1.Clear
For i = 0 To 4
  'GridResultados.Row = i
  'GridResultados.Text = vectorVelocidades(i)
  List1.AddItem (vectorVelocidadFinal(i))
Next

End Sub

Sub Metodo_Gaus()
Dim i, j, k As Integer
Dim suma As Double

```

5.6. ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES EN LAS SECCIÓN DEL TRAMO I

```
For k = 0 To 3
  For i = k + 1 To 4
    cGauss = matrizL_F(i, k) / matrizL_F(k, k)
    For j = k + 1 To 4
      matrizL_F(i, j) = matrizL_F(i, j) - cGauss * matrizL_F(k, j)
    Next j
    vectorDensidadEstimada(i) = -cGauss * vectorDensidadEstimada(k) + vectorDensidadEstimada(i)
  Next i
Next k
'Sustitucion hacia atras para encontrar las velocidades
vectorVelocidad(4) = vectorDensidadEstimada(4) / matrizL_F(4, 4)
For i = 3 To 0 Step -1
  suma = 0
  For j = i + 1 To 4
    suma = suma + (matrizL_F(i, j) * vectorVelocidad(j))
  Next j
  vectorVelocidad(i) = (vectorDensidadEstimada(i) - suma) / matrizL_F(i, i)
Next i
Next k
End Sub
```


Capítulo 6

Recopilación de datos y cálculos

Los datos utilizados para la estimación de velocidad y cálculo de flujo de saturación, fueron obtenidos en campo por los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil de la PUCE, en la Autopista General Rumiñahui, en el tramo comprendido entre el puente 5 y el puente 7. En el tramo se escogieron 6 puntos para tomar mediciones sobre el conteo de vehículos, así el tramo quedó dividido en 5 secciones.

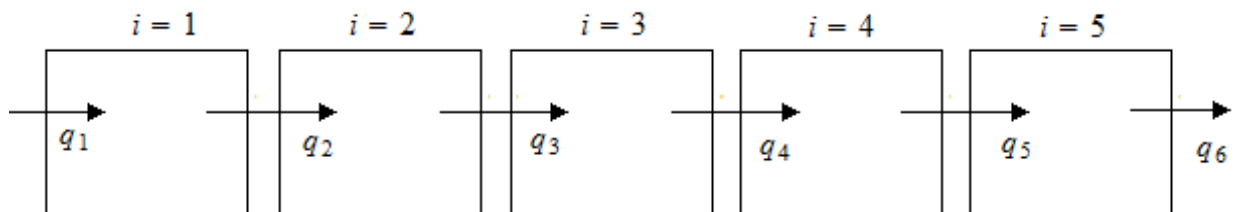


Figura 6.1: Tramo dividido en 5 secciones de 300 400 300 300 400

El conteo de vehículos fue realizado en 3 días de la semana del 29/09/2014 al 05/10/2014. Los informes correspondientes al conteo vehicular están detallados en el anexo A

6.1. Recopilación de datos

Los resultados obtenidos a partir de los informes proporcionados por los estudiantes los resumimos en las siguientes tablas.

Primer día de mediciones	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1186	1206	893	815	776	878
Vehículos pesados	262	220	324	193	171	215
total de vehículos	1448	1426	1217	1008	947	1093
flujo (Veh/hora)	1448	1426	1217	1008	947	1093
velocidad permitida	80					
densidad (flujo/velocidad)	18.1					

Cuadro 6.1: Régimen de tráfico fluido (primer día de mediciones)

Segundo día de mediciones	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1100	1215	1015	903	922	873
Vehículos pesados	234	146	216	213	230	201
total de vehículos	1334	1361	1231	1116	1152	1074
flujo (Veh/hora)	1334	1361	1231	1116	1152	1074
velocidad permitida	80					
densidad (flujo/velocidad)	17,0125					

Cuadro 6.2: Régimen de tráfico fluido (segundo día de mediciones)

Tercer día de mediciones	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1231	1586	1169	1009	992	1071
Vehículos pesados	224	178	83	82	84	75
total de vehículos	1455	1764	1252	1091	1076	1146
flujo (Veh/hora)	1455	1764	1252	1091	1076	1146
velocidad permitida	80					
densidad (flujo/velocidad)	22.05					

Cuadro 6.3: Régimen de tráfico fluido (tercer día de mediciones)

Para el cálculo de la densidad en las 3 tablas anteriores, se utilizó el máximo de los flujos dividido para la velocidad permitida.

6.2. Cálculos por el método de factores de ajuste

Para calcular el flujo vehicular de saturación en cada punto escogido para mediciones de campo se utilizó el siguiente modelo:

$$S_i = S_0 N f_W f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb}$$

descrito en el capítulo 3.

Primer día de mediciones

Factores de ajuste para tráfico fluido

Factores de Ajuste	Primer día de mediciones					
	1900	1900	1900	1900	1900	1900
S_0	1900	1900	1900	1900	1900	1900
N	2	2	2	2	2	2
f_w	1	1	1	1	1	1
f_{HV}	0.819	0.846	0.734	0.809	0.819	0.803
f_G	1	1	1	1	1	1
f_P	1	1	1	1	1	1
f_{bb}	0.688	0.786	0.786	0.798	0.806	0.810
f_a	1	1	1	1	1	1
f_{LU}	1	1	1	1	1	1
f_{RT}	1	1	1	1	1	1
f_{Lpb}	1	1	1	1	1	1
f_{Rpb}	1	1	1	1	1	1
S_i	2141.352	2526.003	2191.629	2451.792	2509.745	2472.538

Cuadro 6.4: Factores de ajuste para tráfico fluido (primer día de mediciones)

Factores de ajuste para tráfico congestionado

Factores de Ajuste	Primer día de mediciones					
	1900	1900	1900	1900	1900	1900
S_0	1900	1900	1900	1900	1900	1900
N	2	2	2	2	2	2
f_w	1	1	1	1	1	1
f_{HV}	0.906	0.847	0.823	0.830	0.793	0.830
f_G	1	1	1	1	1	1
f_P	1	1	1	1	1	1
f_{bb}	0.872	0.776	0.746	0.704	0.6	0.804
f_a	1	1	1	1	1	1
f_{LU}	1	1	1	1	1	1
f_{RT}	1	1	1	1	1	1
f_{Lpb}	1	1	1	1	1	1
f_{Rpb}	1	1	1	1	1	1
S_i	3002.95	2497.111	2333.169	2219.118	1807.794	2534.990

Cuadro 6.5: Factores de ajuste para tráfico congestionado (primer día de mediciones)

Flujo para tráfico fluido

	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1186	1206	893	815	776	878
Vehículos pesados	262	220	324	193	171	215
Buses (incluidos en el grupo de vehículos pesados)	156	107	107	101	97	95
Flujo	2141.352	2526.003	2191.629	2451.792	2509.750	2472.538

Cuadro 6.6: Flujo para tráfico fluido (primer día de mediciones)

Flujo para tráfico congestionado

	Puntos para el régimen de tráfico congestionado					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1247	1266	1200	1231	1294	921
Vehículos pesados	129	229	258	253	338	189
Buses (incluidos en el grupo de vehículos pesados)	64	112	127	148	200	98
Flujo	3002,950	2497,111	2333,169	2219,118	1807,794	2534,990

Cuadro 6.7: Flujo para tráfico congestionado (primer día de mediciones)

Segundo día de mediciones

Factores de ajuste para tráfico fluido

Factores de Ajuste	Segundo día de mediciones					
S_0	1900	1900	1900	1900	1900	1900
N	2	2	2	2	2	2
f_w	1	1	1	1	1	1
f_{HV}	0.825	0.893	0.825	0.809	0.800	0.813
f_G	1	1	1	1	1	1
f_P	1	1	1	1	1	1
f_{bb}	0.79	0.788	0.788	0.8	0.782	0.816
f_a	1	1	1	1	1	1
f_{LU}	1	1	1	1	1	1
f_{RT}	1	1	1	1	1	1
f_{Lpb}	1	1	1	1	1	1
f_{Rpb}	1	1	1	1	1	1
S_i	2475.412	2673.179	2468.981	2459.785	2378.312	2520.483

Cuadro 6.8: Factores de ajuste para tráfico fluido (segundo día de mediciones)

Factores de ajuste para tráfico congestionado

Factores de Ajuste	Segundo día de mediciones					
	1900	1900	1900	1900	1900	1900
S_0	1900	1900	1900	1900	1900	1900
N	2	2	2	2	2	2
f_w	1	1	1	1	1	1
f_{HV}	0.837	0.846	0.815	0.874	0.827	0.798
f_G	1	1	1	1	1	1
f_P	1	1	1	1	1	1
f_{bb}	0.738	0.772	0.75	0.762	0.78	0.766
f_a	1	1	1	1	1	1
f_{LU}	1	1	1	1	1	1
f_{RT}	1	1	1	1	1	1
f_{Lpb}	1	1	1	1	1	1
f_{Rpb}	1	1	1	1	1	1
S_i	2348.005	2481.537	2323.949	2529.877	2450.451	2323.533

Cuadro 6.9: Factores de ajuste para tráfico congestionado (segundo día de mediciones)

Flujo para tráfico fluido

	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1100	1215	1015	903	922	873
Vehículos pesados	234	146	216	213	230	201
Buses (incluidos en el grupo de vehículos pesados)	105	106	106	100	109	92
Flujo	2475,412	2673,179	2468,981	2459,785	2378,312	2520,483

Cuadro 6.10: Flujo para tráfico fluido (segundo día de mediciones)

Flujo para tráfico congestionado

	Puntos para el régimen de tráfico congestionado					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1209	1290	1047	1425	1546	1001
Vehículos pesados	235	235	237	206	324	253
Buses (incluidos en el grupo de vehículos pesados)	131	114	125	119	110	117
Flujo	2348,005	2481,537	2323,949	2529,877	2450,451	2323,533

Cuadro 6.11: Flujo para tráfico congestionado (segundo día de mediciones)

Tercer día de mediciones**Factores de ajuste para tráfico fluido**

Factores de Ajuste	Tercer día de mediciones					
	1900	1900	1900	1900	1900	1900
S_0	1900	1900	1900	1900	1900	1900
N	2	2	2	2	2	2
f_w	1	1	1	1	1	1
f_{HV}	0,846	0,899	0,934	0,925	0,922	0,935
f_G	1	1	1	1	1	1
f_P	1	1	1	1	1	1
f_{bb}	0,776	0,826	0,872	0,876	0,884	0,882
f_a	1	1	1	1	1	1
f_{LU}	1	1	1	1	1	1
f_{RT}	1	1	1	1	1	1
f_{Lpb}	1	1	1	1	1	1
f_{Rpb}	1	1	1	1	1	1
S_i	2494,827	2822,073	3093,928	3078,606	3096,958	3132,254

Cuadro 6.12: Factores de ajuste para tráfico fluido (tercer día de mediciones)

Factores de ajuste para tráfico congestionado

Factores de Ajuste	Tercer día de mediciones					
	1900	1900	1900	1900	1900	1900
S_0	1900	1900	1900	1900	1900	1900
N	2	2	2	2	2	2
f_w	1	1	1	1	1	1
f_{HV}	0,894	0,910	0,875	0,880	0,865	0,926
f_G	1	1	1	1	1	1
f_P	1	1	1	1	1	1
f_{bb}	0,828	0,834	0,788	0,868	0,814	0,876
f_a	1	1	1	1	1	1
f_{LU}	1	1	1	1	1	1
f_{RT}	1	1	1	1	1	1
f_{Lpb}	1	1	1	1	1	1
f_{Rpb}	1	1	1	1	1	1
S_i	2814,171	2883,092	2620,919	2901,938	2676,808	3081,335

Cuadro 6.13: Factores de ajuste para tráfico congestionado (tercer día de mediciones)

Flujo para tráfico fluido

	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1231	1586	1169	1009	992	1071
Vehículos pesados	224	178	83	82	84	75
Buses (incluidos en el grupo de vehículos pesados)	112	87	64	62	58	59
Flujo	2494,827	2822,073	3093,928	3078,606	3096,958	3132,254

Cuadro 6.14: Flujo para tráfico fluido (tercer día de mediciones)

Flujo para tráfico congestionado

	Puntos para el régimen de tráfico congestionado					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1296	1572	1200	710	945	1158
Vehículos pesados	153	156	171	97	147	93
Buses (incluidos en el grupo de vehículos pesados)	86	83	106	66	93	62
Flujo	2814,171	2883,092	2620,919	2901,938	2676,808	3081,335

Cuadro 6.15: Flujo para tráfico congestionado (tercer día de mediciones)

El cálculo por el método de factores de ajuste arrojó los siguientes resultados:

\mathcal{S}_i

2141.352	2526.003	2191.629	2451.792	2509.745	2472.538
----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico fluido (primer día de mediciones)

\mathcal{S}_i

2475.412	2673.179	2468.981	2459.785	2378.312	2520.483
----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico fluido (segundo día de mediciones)

\mathcal{S}_i

2494,827	2822,073	3093,928	3078,606	3096,958	3132,254
----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico fluido (tercer día de mediciones)

\mathcal{S}_i

3002.950	2497.111	2333.169	2219.118	1807.794	2534.990
----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico congestionado (primer día de mediciones)

S_i	2348.005	2481.537	2323.949	2529.877	2450.451	2323.533
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico congestionado (segundo día de mediciones)

S_i	2814,171	2883,092	2620,919	2901,938	2676,808	3081,335
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico congestionado (tercer día de mediciones)

6.3. Cálculos de la estimación de velocidad

La estimación de la velocidad es la correspondiente a cada sección del tramo comprendido entre el puente 5 y el puente 7 de la Autopista General Rumiñahui.

Para la estimación de la velocidad se considero que la densidad era constante en todo el tramo y se la obtuvo como la relación entre el máximo flujo de las secciones y la velocidad permitida en el tramo de autopista estudiado. El flujo vehicular en cada punto corresponde al número de vehículos contados por los estudiantes.

Para el primer día de mediciones se obtuvo que las velocidades estimadas en las 5 secciones del tramo fueron.

Form1

Velocidades Permitida
v:

Procesar

Flujo Pesados:
q11:
q21:
q31:
q41:
q51:
q61:

Longitud:
L1:
L2:
L3:
L4:
L5:

78.784530386740:
67.237569060773:
55.690607734806:
52.320441988950:
60.386740331491:

Calculadas a partir de la información de la siguiente tabla:

	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
Primer día de mediciones	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1186	1206	893	815	776	878
Vehículos pesados	262	220	324	193	171	215
total de vehículos	1448	1426	1217	1008	947	1093
flujo (Veh/hora)	1448	1426	1217	1008	947	1093
velocidad permitida	80					
densidad (flujo/velocidad)	18.1					

Para el segundo día de mediciones se obtuvo que las velocidades estimadas en las 5 secciones del tramo fueron.

Calculadas a partir de la información de la siguiente tabla:

	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
Segundo día de mediciones	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1100	1215	1015	903	922	873
Vehículos pesados	234	146	216	213	230	201
total de vehículos	1334	1361	1231	1116	1152	1074
flujo (Veh/hora)	1334	1361	1231	1116	1152	1074
velocidad permitida	80					
densidad (flujo/velocidad)	17.0125					

Para el tercer día de mediciones se obtuvo que las velocidades estimadas en las 5 secciones del tramo fueron.

Calculadas a partir de la información de la siguiente tabla:

Tercer día de mediciones	Puntos para el régimen de tráfico fluido					
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 4	punto 5	punto 6
Vehículos livianos	1231	1586	1169	1009	992	1071
Vehículos pesados	224	178	83	82	84	75
total de vehículos	1455	1764	1252	1091	1076	1146
flujo (Veh/hora)	1455	1764	1252	1091	1076	1146
velocidad permitida	80					
densidad (flujo/velocidad)	22.05					

Capítulo 7

Resultados y conclusiones

7.1. Resultados

Cuando utilizamos el método de factores de ajuste para flujos de saturación se obtuvo el flujo de saturación en un tramo recto de autopista dividido en 5 secciones, los resultados fueron los siguientes:

S_i	2141.352	2526.003	2191.629	2451.792	2509.745	2472.538
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico fluido (primer día de mediciones)

S_i	2475.412	2673.179	2468.981	2459.785	2378.312	2520.483
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico fluido (segundo día de mediciones)

S_i	2494,827	2822,073	3093,928	3078,606	3096,958	3132,254
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico fluido (tercer día de mediciones)

S_i	3002.950	2497.111	2333.169	2219.118	1807.794	2534.990
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico congestionado (primer día de mediciones)

S_i	2348.005	2481.537	2323.949	2529.877	2450.451	2323.533
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico congestionado (segundo día de mediciones)

S_i	2814,171	2883,092	2620,919	2901,938	2676,808	3081,335
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

 para tráfico congestionado (tercer día de mediciones)

Al utilizar un esquema numérico basado en un modelo macroscópico del flujo vehicular (LWR), fue posible calcular la estimación de la velocidad en cada sección de un tramo de autopista examinado. Los resultados los presentamos a continuación:

Primer día de mediciones en flujo fluido

78,78 67,24 55,69 52,32 60,39

Segundo día de mediciones en flujo fluido

80 72,36 65,60 67,71 63,13

Tercer día de mediciones en flujo fluido

80 56,78 49,48 48,80 51,97

7.2. Conclusiones

Partiendo del hecho de que para analizar el flujo vehicular en el tramo de autopista que fue objeto de nuestro estudio, solo se tenía como información el conteo de vehículos por unidad de tiempo, los métodos escogidos para el análisis del flujo nos permiten concluir lo siguiente:

- El método de factores de ajuste que generalmente es utilizado para calcular el flujo de saturación vehicular en ciudades nos permite calcular también el flujo de saturación en autopistas teniendo como única información el conteo vehicular, sin embargo no podemos asegurar que el resultado obtenido se aproxime al real.
- Al utilizar el esquema numérico basado en el modelo de primer orden LWR, fue posible estimar la velocidad solo a partir de los datos de conteo vehicular, pero esto puede realizarse únicamente para flujos vehiculares con características como las de nuestro estudio, es decir se considera una densidad constante en un tramo recto de autopista.

7.3. Recomendaciones

El esquema de estimación para velocidad y densidad simultánea, da como resultado buenas aproximaciones, sería adecuado también utilizarlo en tramos rectos de autopista con rampas de acceso.

Bibliografía

- [1] Apostol, T. M., Calculus, Volumen 1, Segunda Edición, Editorial Reverté, Barcelona, 1977.
- [2] BENALCAZAR HERNAN, Apuntes de análisis numérico II, Universidad Central del Ecuador, 2008.
- [3] BURGERS J. (1948). A mathematical model illustrating the theory of turbulence. Adv. Appl. Mech, 1:171-199
- [4] CHANUT, S. (2005). Modélisation dynamique macroscopique de l'écoulement d'un trafic router hétérogène poids lourds et véhicules légers. Thèse de doctoral, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
- [5] DAGANZO, C. (1994). The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. Transport. Res. B, 28.
- [6] DAGANZO, C. (2002). A behavioral theory of multi-lane traffic flow, part 1: Long homogeneous freeway sections. Transportation. Research. Part. B., 36.
- [7] DELGADO, J., SAAVEDRA, P y VELASCO, R. M., Modelación de problemas de flujo vehicular, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 2011.
- [8] DEL-CASTILLO, J. (1996). Car following model based on lighthill-whitham theory. In In Proceeding of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory ISTTT, Lyon, France.
- [9] G. GOMEZ, HOROWITZ, R., KURZHANSKIY, A., VARAIYA, P. et KWON, J. (2008). Behavior of cell transmission model and effectiveness of metering. Transportation Research. Part. C, 16:485-513.
- [10] GADUNOV, S. (1959). A difference method for numerical calculation of discontinuous solutions of hydrodynamic equations. Matematicheskii Sbornik, 47:271-190.
- [11] GREENSHIELD, B. (1935). A study of capacity. In In Proceedings of the Highway Research Board, volume 14, pages 967-976.
- [12] LIGHTHILL, M. et WHITHAM, G. (1955). On kinematic waves ii: A theory of traffic flow on long crowded roads. Proc Roy Soc, pages 317-345.
- [13] MOUTARI, M. (2007). Modélisation mathématique et numérique du trafic automobile. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, France.

- [14] MUNOZ, L., SUN, X., HOROWITZ, R. et ALVAREZ-ICAZA, L. (2003). Traffic density estimation with the cell transmission model. In Proceeding of the American Control Conference, pages 3750-3755, Denver, Colorado.
- [15] NORMAS APA (AMERICAN PSYCHOLOGICAL ASSOCIATION) (2014).
- [16] RICHARDS, P. (1956). Shock waves on the highway. Operations. Research, 4(1):42-51.
- [17] ROSAS-JAIMES, O. et ALVAREZ-ICAZA, L. (2007). Vehicle density and velocity estimation on highways for an-ran metering contrl. Nonlinear Dynamic, 49:555-566.
- [18] R. B. GUENTHER y J. W. LEE., Partial differential Equations of Matematical Physics and Integral Equation, Dover, 1988.
- [19] SOLÓRZANO JUAN PABLO, Apuntes de Ingeniería de Tráfico, Ing. Civil, MSC. Ingeniería y Planificación de Transporte.

Capítulo 8

Anexos

Anexo A Informes de conteo de automóviles en la Autopista "General Rumiñahui"

Es ta plantilla fue la utilizada por los estudiantes para el conteo manual de vehículos.

ESTACIÓN:		AFORADOR:		FECHA:		ASERTACIONES:			
SERIE:		PARA INICIAL:		PARA FINAL:					
NOMBRE DEL AFORADOR:									
CATEGORÍA I (LÍMPIOS)		CATEGORÍA II (BUSES 2 EJES)		CATEGORÍA III (CAMIONES 2 EJES)		CATEGORÍA IV (BUSES 3 EJES - CAMIONES 3 EJES)		CATEGORÍA V (CAMIONES 5 EJES)	
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	TOTAL	TOTAL	TOTAL	TOTAL	TOTAL
ESTACIÓN:		AFORADOR:		FECHA:		ASERTACIONES:			
SERIE:		PARA INICIAL:		PARA FINAL:					
NOMBRE DEL AFORADOR:									
CATEGORÍA I (LÍMPIOS)		CATEGORÍA II (BUSES 2 EJES)		CATEGORÍA III (CAMIONES 2 EJES)		CATEGORÍA IV (BUSES 3 EJES - CAMIONES 3 EJES)		CATEGORÍA V (CAMIONES 5 EJES)	
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	TOTAL	TOTAL	TOTAL	TOTAL	TOTAL

Figura 8.1: Plantilla de conteo manual

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

**TEMA: INFORME DE CONTEO DE AUTOMÓVILES EN LA AUTOPISTA
“GENERAL RUMIÑAHUI” – PUENTE 5**

JESSICA CASTRO

ADRIÁN SERRANO

2014

INFORME DE CONTEO DE AUTOMÓVILES – AUTOPISTA “GENERAL RUMIÑAHUI”

- Sentido Norte - Sur

- **Martes 30 de Septiembre 2014**

Hora: 7:10 am – 8:10 am

- ❖ Categoría I (livianos)
1247
- ❖ Categoría II (Buses 2 ejes)
64
- ❖ Categoría III (Camiones dos ejes)
59
- ❖ Categoría IV (Buses 3 ejes – Camiones 3 ejes)
3
- ❖ Categoría V (Camiones 4 ejes o más)
3

Hora: 2:00 – 3:00 (pm)

- ❖ Categoría I (livianos)
1186
- ❖ Categoría II (Buses 2 ejes)
156
- ❖ Categoría III (Camiones dos ejes)
86
- ❖ Categoría IV (Buses 3 ejes – Camiones 3 ejes)
13
- ❖ Categoría V (Camiones 4 ejes o más)
7

- **Miércoles 1 de Octubre 2014**

Hora: 7:00 – 8:00 (am)

- ❖ Categoría I (livianos)
1209
- ❖ Categoría II (Buses 2 ejes)
131
- ❖ Categoría III (Camiones dos ejes)
95
- ❖ Categoría IV (Buses 3 ejes – Camiones 3 ejes)
7
- ❖ Categoría V (Camiones 4 ejes o más)

2

Hora: 2:00 – 3:00 (pm)

- ❖ Categoría I (livianos)
1100
- ❖ Categoría II (Buses 2 ejes)
105
- ❖ Categoría III (Camiones dos ejes)
96
- ❖ Categoría IV (Buses 3 ejes – Camiones 3 ejes)
14
- ❖ Categoría V (Camiones 4 ejes o más)
19
- **Viernes 3 de Octubre 2014**

Hora: 7:00 – 8:00 (am)

- ❖ Categoría I (livianos)
1296
- ❖ Categoría II (Buses 2 ejes)
86
- ❖ Categoría III (Camiones dos ejes)
43
- ❖ Categoría IV (Buses 3 ejes – Camiones 3 ejes)
15
- ❖ Categoría V (Camiones 4 ejes o más)
9

Hora: 1:50 – 2:50 (pm)

- ❖ Categoría I (livianos)
1231
- ❖ Categoría II (Buses 2 ejes)
112
- ❖ Categoría III (Camiones dos ejes)
91
- ❖ Categoría IV (Buses 3 ejes – Camiones 3 ejes)
6
- ❖ Categoría V (Camiones 4 ejes o más)
15

Conteo vehicular

Sección:

Puente número 5, 275 metros más abajo sentido norte-sur del puente de la autopista General Rumiñahui

Estudiantes:

- Marcelo Barros
- Andy Flor

Día Martes 30 de septiembre

Horario 13h00- 14h00

Categoría 1 (liviano): 1266

Categoría 2 (buses 2 ejes): 112

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 87

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 20

Categoría 5 (camiones de 4 ejes y más): 10

Horario 14h00- 15h00

Categoría 1(liviano): 1206

Categoría 2 (buses 2 ejes): 107

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 81

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 18

Categoría 5 camiones de 4 ejes y más: 14

Día Viernes 3 de octubre

Horario 13h00- 14h00

Categoría 1 (liviano): 1290

Categoría 2 (buses 2 ejes): 114

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 90

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 23

Categoría 5 (camiones de 4 ejes y más): 8

Horario 14h00- 15h00

Categoría 1(liviano): 1215

Categoría 2 (buses 2 ejes): 106

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 20

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 10

Categoría 5 camiones de 4 ejes y más: 10

Día Sábado 3 de octubre

Horario 13h00- 14h00

Categoría 1 (liviano): 1572

Categoría 2 (buses 2 ejes): 83

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 52

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 7

Categoría 5 (camiones de 4 ejes y más): 14

Día Viernes 3 de octubre

Horario 13h00- 14h00

Categoría 1 (liviano): 1290

Categoría 2 (buses 2 ejes): 114

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 90

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 23

Categoría 5 (camiones de 4 ejes y más): 8

Horario 14h00- 15h00

Categoría 1(liviano): 1215

Categoría 2 (buses 2 ejes): 106

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 20

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 10

Categoría 5 camiones de 4 ejes y más: 10

Día Sábado 3 de octubre

Horario 13h00- 14h00

Categoría 1 (liviano): 1572

Categoría 2 (buses 2 ejes): 83

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 52

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 7

Categoría 5 (camiones de 4 ejes y más): 14

Horario 14h00- 15h00

Categoría 1(liviano): 1586

Categoría 2 (buses 2 ejes): 87

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 48

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 3

Categoría 5 camiones de 4 ejes y más: 10

PUNTO TRES

Primer día de conteo de vehículos

Fecha: 01/10/2014

Hora: de 13:30 a 14:30

Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
1200	127	110	0	21

Hora: de 14:30 a 15:30

Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
893	107	96	7	14

Segundo día de conteo de vehículos

Fecha: 03/10/2014

Hora: 8:30 a 9:30

Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
1047	125	97	8	7

Hora: de 9:30 a 10:30

Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
1015	106	93	7	10

Tercer día de conteo de vehículos

Fecha: 05/10/2014

Hora: 8:30 a 9:30

Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
1200	106	51	10	4

Hora: de 9:30 a 10:30

Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
1169	64	10	6	3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

Facultad de Ingeniería

Escuela de Civil

Nombre: Alberto Valarezo

José Alvarado

		Miércoles	Viernes	Domingo
		13:30-14:30	8:30-9:30	8:30-9:30
		14:30-15:30	9:30-10:30	9:30-10:30
Categoría I	Congestionado	1231	1425	710
	Fluido	815	903	1009
Categoría II	Congestionado	148	119	66
	Fluido	101	100	62
Categoría III	Congestionado	89	75	25
	Fluido	75	102	13
Categoría IV	Congestionado	11	8	3
	Fluido	4	1	3
Categoría V	Congestionado	5	4	3
	Fluido	13	10	4

Informe del conteo de vehículos en Autopista General Rumiñahui

Realizado por: Felipe Arias

Ivanova Tapia

El presente documento corresponde al informe final del conteo de vehículo en la Autopista General Rumiñahui ubicada en el sector del Valle de los Chillos el cual fue realizado por los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Escuela de Civil Felipe Arias e Ivanova Tapia en el punto número 5 que se indica en el estudio.

Las fechas de asistencia fueron: miércoles 1 de octubre, viernes 3 de octubre, sábado 4 de octubre y domingo 5 de octubre. Todas las fechas corresponden al año 2014.

Para mayor detalle a continuación se presenta una tabla de los horarios en los que se asistió a realizar el conteo de vehículos:

ASISTENCIA	Miércoles	Viernes	Sábado	Domingo
Congestionado	13:00 -14:00	7:30 -8:30	13:00 - 14:00	
Fluido	14:20 - 15:20	9:34 - 10:34		15:38 - 16:38

El conteo se realizó por categorías obteniendo así los siguientes resultados:

Categorías	Flujo	Dias			
		Miércoles	Viernes	Sábado	Domingo
Categoría I	Congestionado	1294	1546	945	
	Fluido	776	922		992
Categoría II	Congestionado	200	110	93	
	Fluido	97	109		58
Categoría III	Congestionado	94	179	47	
	Fluido	61	107		20
Categoría IV	Congestionado	14	18	5	
	Fluido	7	2		2
Categoría V	Congestionado	30	17	2	
	Fluido	6	12		4

Conteo vehicular

Sección:

En el puente 7

Estudiantes:

- Katherine Vicuña
- Jazmín Paredes

Día Miércoles 01 de octubre del 2014

Horario 13h00- 14h00

Categoría 1 (liviano): 921

Categoría 2 (buses 2 ejes): 98

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 72

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 6

Categoría 5 (camiones de 4 ejes y más): 13

Horario 14h00- 15h00

Categoría 1(liviano): 878

Categoría 2 (buses 2 ejes): 95

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 87

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 10

Categoría 5 camiones de 4 ejes y más: 23

Día Viernes 3 de octubre

Horario 08:30 a 09:30

Categoría 1 (liviano): 1001

Categoría 2 (buses 2 ejes): 117

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 114

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 5

Categoría 5 (camiones de 4 ejes y más): 17

Horario 09:30 a 10:30 am

Categoría 1(liviano): 873

Categoría 2 (buses 2 ejes): 92

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 92

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 3

Categoría 5 camiones de 4 ejes y más: 14

Día Domingo 4 de octubre

Horario 08:30 a 09:30 am

Categoría 1 (liviano): 1158

Categoría 2 (buses 2 ejes): 62

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 25

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 3

Categoría 5 (camiones de 4 ejes y más): 3

Horario 09:30 a 10:30 am

Categoría 1(liviano): 1071

Categoría 2 (buses 2 ejes): 59

Categoría 3 (camiones 2 ejes): 11

Categoría 4 (buses y camiones 3 ejes): 3

Categoría 5 camiones de 4 ejes y más: 2

Nota: El conteo de este informe, se lo realizó durante lapsos de una hora con 5 minutos de descanso incluidos.

Anexo B Fotos de tramos en la autopista "General Rumiñahui"??

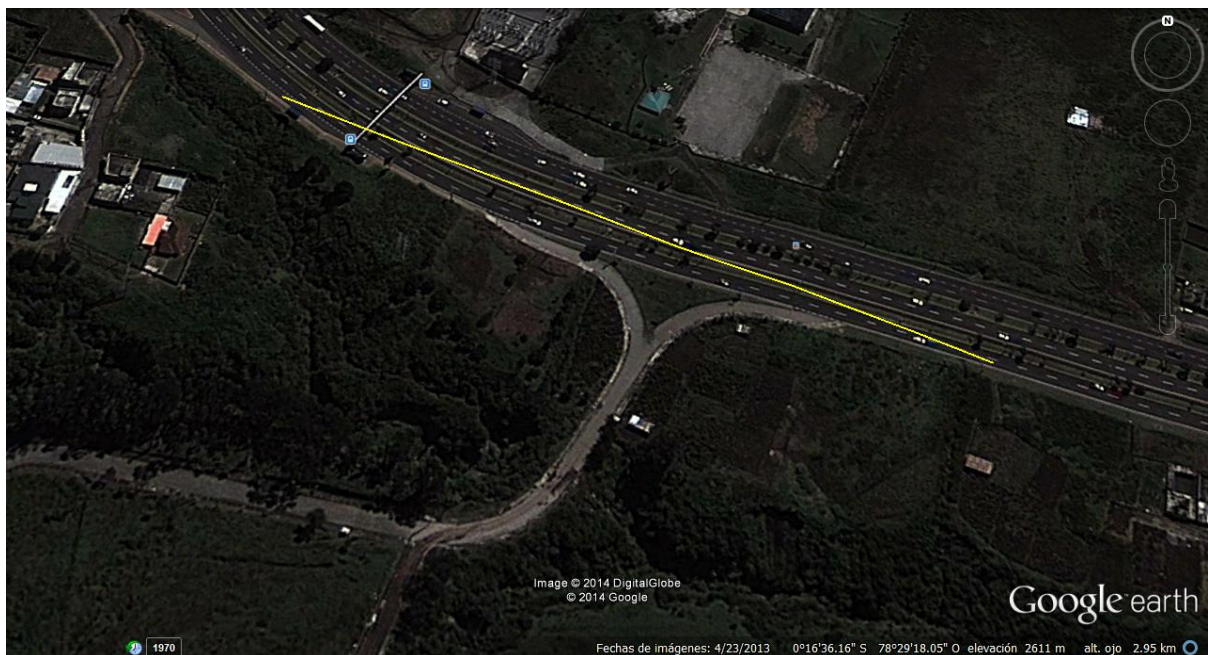


Figura 8.2: Foto 1 A2 300m (25m puente 5 275m)

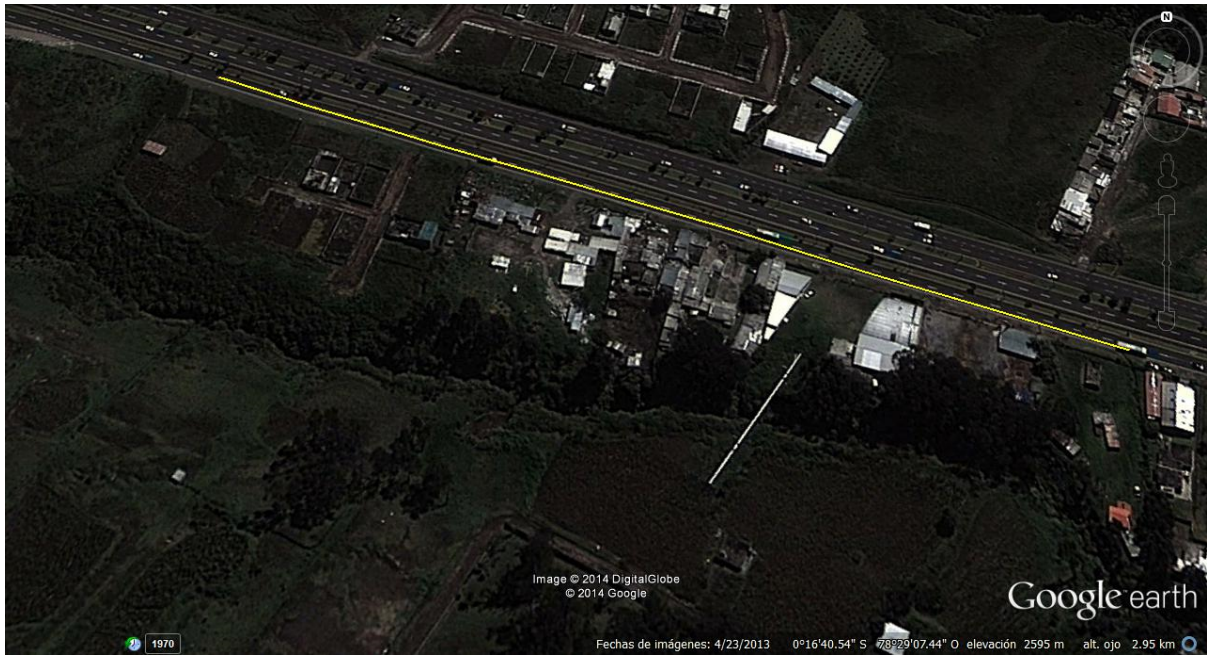


Figura 8.3: Foto 2 B2 400m (entre puente 5 y puente 6)

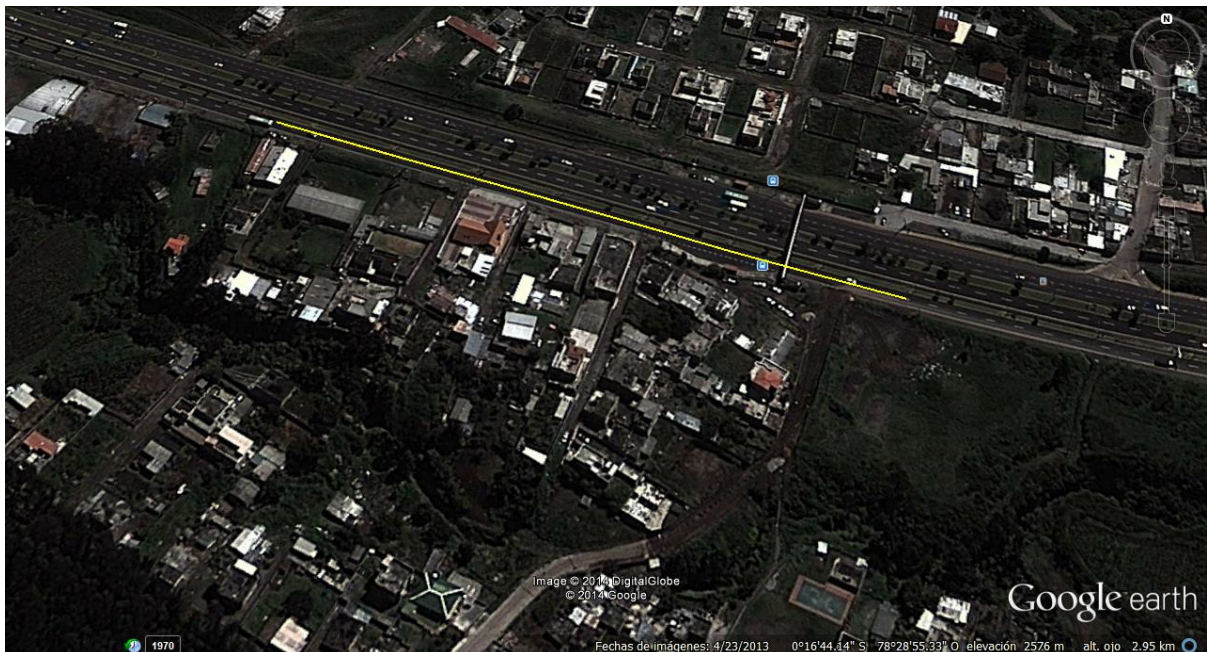


Figura 8.4: Foto 3 C2 300m (230m puente 6 70m)



Figura 8.5: Foto 4 D2 300m (entre puente 6 y puente 7)



Figura 8.6: Foto 5 E2 400m(380m antes puente6 20m después puente 7)



Figura 8.7: Foto 6 E2 final (20m después puente 7)