

## Un modelo de predicción de tráfico en la ciudad de Ambato

*Marcelo Pilamunga P.<sup>1</sup>, David Ríos Insua<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Facultad de Diseño, Arquitectura y Artes, Universidad Técnica de Ambato, Av. Los Chasquis y Río Payamino, Ambato, Ecuador, 1801334.

<sup>2</sup> ICMAT-CSIC, C/Nicolás Cabrera 13-15 Campus de Cantoblanco, UAM, Madrid, España, 28049.

Autores para correspondencia: em.pilamunga@uta.edu.ec, david.rios@icmat.es

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

### RESUMEN

Este artículo contiene el estudio inicial de un modelo de predicción de tráfico, que intenta mostrar cómo puede complementarse la toma de decisiones que afecten a la ciudad a través de una buena planificación vial. Esto permitirá dar alternativas posibles de solución mediante la predicción de flujos de tráfico y determinando las intersecciones de mayor influencia dentro de la red vial, lo que por consecuencia reduciría costes en tiempo, combustible, contaminación, etc., obteniendo así una herramienta de ayuda en la toma de decisiones respecto del tráfico. Específicamente, se utiliza modelos dinámicos lineales para predecir el tráfico en distintos puntos de una ciudad y, en consecuencia, pronosticar su eventual saturación. Se puede así predecir puntos de la ciudad en la que es necesario actuar para aliviar los problemas de tráfico antes de que éstos lleguen a manifestarse.

Palabras clave: Tráfico, predicción, planificación vial, modelos dinámicos lineales, saturación, Ambato.

### ABSTRACT

This paper reports the results of an initial study about a traffic prediction model, which attempts to complement city decisions by providing a good road planning. The prediction of traffic flows and the identification of intersections with major problems within the road network might enable identifying timely solutions. A support tool in decision-making regarding traffic will reduce costs in time, fuel, pollution, etc. The study uses linear dynamic models to forecast the traffic flow in the city and points where traffic saturation is likely to occur, so that timely actions can be taken to reduce traffic pressure before jams occur.

Keywords: Traffic, forecast, road planning, dynamic linear models, traffic saturation, Ambato.

## 1. INTRODUCCIÓN

La inversión en la gestión de actividades integradas para un mejor desarrollo comunitario determina el progreso de una ciudad. Así, generar acciones encaminadas al cambio y evolución debe y puede promover mayor satisfacción entre sus habitantes.

Una de esas actividades es la concerniente al tránsito, que es uno de los factores más trascendentales en la calidad de vida de una ciudad moderna. Así, una buena planificación vial es de vital importancia para el desarrollo de las mismas. Para ello, se deben realizar estudios que nos permitan tener un diagnóstico de la realidad y así tomar decisiones que ayuden a minimizar o evitar problemas que se están presentando o que pudieran aparecer en el futuro. Sin embargo, realizar un estudio de este tipo cada vez que se requiera es costoso en términos de tiempo y recursos.

La elaboración de modelos que ayuden a predecir y simular el tráfico y determinar posibles alternativas de solución a los problemas que se presentan en el flujo vehicular en una ciudad resulta de gran utilidad para ayudarnos en la toma de decisiones pertinentes. Puede verse una introducción a estos problemas y sus soluciones en Stathopoulos & Karlaftis (2003). Este trabajo propone un modelo que permita realizar predicciones a corto plazo de los flujos de tráfico en distintas secciones relevantes de una ciudad y, en consecuencia, predecir cuestiones como la saturación de tráfico en las mismas, determinando así las posibles soluciones a la congestión vial que se pueda presentar en un momento dado. Ilustramos el modelo con datos pertenecientes a la ciudad de Ambato.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1. Marco teórico

El flujo de vehículos en una red urbana presenta aspectos relevantes que justifican un tratamiento más elaborado que la coordinación de un conjunto de arterias viales. Seguidamente, se realiza una breve revisión de algunas técnicas y modelos relevantes en el problema que nos ocupa.

En primer lugar es necesario exponer algunas definiciones y principios básicos en redes. Una red vial es un conjunto de calles y avenidas que se cruzan en intersecciones, que puedan ocurrir a nivel o desnivel. Los conceptos de camino, trayectoria y circuito que se registran en una red urbana son bien conocidos. En general los tramos de calles o avenidas tienen un cierto sentido de circulación y, por tanto, se designan como dirigidos. El modelo básico empleará grafos. Un grafo es un conjunto, no vacío, de objetos llamados vértices (o nodos) y una selección de pares de vértices, llamado aristas, que pueden ser orientados o no (Taha, 2004).

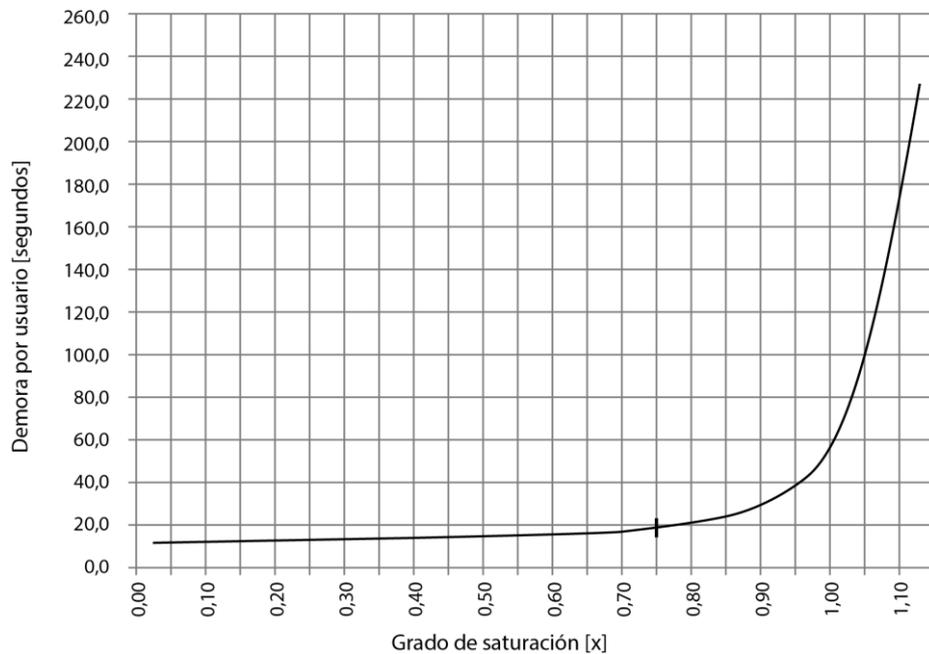
Los estudios de movilidad basados en el análisis y optimización de una red de tráfico mediante la caracterización de la infraestructura y su capacidad incluyen minuciosas investigaciones de campo necesarias para conocer las relaciones origen/destino y sus principales características (motivo de viaje, aparcamiento en origen-destino (O-D), ocupación de los vehículos, tiempo de viaje, etc.). Esto permite ajustar en gran detalle las características funcionales de los diferentes elementos del sistema, incluyendo un análisis pormenorizado de las intersecciones y sus diferentes métodos de regulación, véase Fernández & Valenzuela (2004).

A continuación se indican algunos modelos de tráfico vehicular existentes que ayudan a comprender de mejor manera las ventajas del modelo propuesto. Cada usuario define cómo llegar a un destino, eligiendo la que considere mejor ruta, considerando factores como coste, tiempo, seguridad y comodidad. Los flujos estimados pueden servir tanto para describir el tráfico como para predecir o recomendar un patrón de flujo vehicular en una red. Para ello, por ejemplo, pueden emplearse los modelos de Castillo *et al.* (2002) o Tebaldi & West (1998), que representan el comportamiento macroscópico del tráfico en grandes zonas urbanas o ciudades enteras. Mediante estos modelos es posible estimar los flujos vehiculares en una red donde existe cierta demanda de viajes y los efectos de la congestión hacen que los tiempos de viaje en los arcos dependan de los flujos.

Los impactos urbanos y ambientales asociados al tráfico van, en gran medida, directamente asociados al grado de saturación ( $x$ ) de cualquier dispositivo vial (vía, intersección, paradero, red). El grado de saturación se define como la razón entre el flujo que usa el dispositivo ( $q$ ) y su capacidad ( $Q$ ), es decir,  $x = q/Q$ . Se debe diferenciar el grado de saturación, de la denominada congestión. La segunda es consecuencia del primero y suele manifestarse en:

- Demoras adicionales a las personas, más allá de las requeridas para hacer un viaje a una velocidad segura y constante.
- Colas de vehículos o personas, que se generan en tramos de vía, cruces o terminales de transporte público o privado (paradas, estacionamientos).
- Detenciones involuntarias de vehículos o usuarios, que ocurren en los mismos lugares anteriores, producto del avance y estancamiento de una cola.

Varios estudios, véase por ejemplo Akcelik (1981), IHT (1997), indican que las manifestaciones de la congestión comienzan a producirse para valores de  $x$  superiores a 0,7 ó 0,8. Lo anterior se ilustra en la 0, en el que se muestra la evolución de uno de los índices de congestión: la demora por usuario en un cruce.



**Figura 1.** Variación de la demora con el grado de saturación en un cruce (Revista Eure, XXIX(89), pp. 100).

Durante las últimas décadas, se han propuesto modelos de predicción de flujo de tráfico con distinto grado de complejidad. Los más simples son los de combinación de recorridos aleatorios, pero sólo funcionan bien en situaciones específicas (Williams & Hoel, 1999). Una aproximación más compleja (Head, 1995), se basa en modelos de series temporales ARIMA, ARIMA estacionales (Williams & Hoel, 1999; Lee & Fambro, 1999), filtros de Kalman (Okutani & Stephanedes, 1984) simulación (Banks, 1998; Barceló, 2010), modelos de regresión locales (Willumsen, 1978), combinación de mapas de Kohonen y modelos ARIMA (Voort *et al.*, 1996) y cadenas de Markov véase Yu *et al.* (2003). Aquí emplearemos, como variación, modelos dinámicos lineales. Pueden verse introducciones a estos modelos en West & Harrison (2005) y Petris *et al.* (2009), que incluyen numerosas aplicaciones en la economía y el mundo de los negocios. Sin embargo, se sabe que ésta es la primera aplicación en problemas de tráfico. En comparación con la propuesta antes mencionada, la muestra se aproxima a la de Okutani & Stephanedes (1984), pero tiene la ventaja de permitir incorporar información a priori. Comparadas con las restantes, tiene la ventaja de ser una metodología dinámica, permitiendo predicciones en tiempo real.

## 2.2. El tráfico en Ambato

El problema del tránsito en las grandes ciudades se ha acentuado en las últimas décadas, por el desarrollo de dos fenómenos simultáneos:

- El incremento en la necesidad de movilizarse de un punto a otro ha potenciado el uso del automóvil privado en detrimento del transporte público, debido a que resulta insuficiente para cubrir todos los sectores de la ciudad.
- La generalización del modelo de ciudad difusa (Nel-lo, 1998), que ha alcanzado su desarrollo actual tras un proceso descentralizador.

Ambos problemas se dan en la ciudad de Ambato. Además, la geografía de la urbe y la creciente presencia de autos, sumado a la concentración de entidades públicas y privadas en ciertas zonas de la ciudad, la buena actividad comercial de los mercados e industrias, la gran concentración de estudiantes alrededor de los centros educativos, etc., complican aún más el tránsito en esta ciudad.

En estudios previos (Acevedo, 2011), se determinaron problemas de congestión, y flujo vehicular alrededor de los terminales y paradas de autobús existentes, por lo que en la actualidad, se ha remodelado la estructura física del terminal de Ingahurco para mejorar el flujo y brindar un mejor servicio al usuario.

### 2.3. Análisis del tráfico en la ciudad de Ambato

A continuación se presentan varios problemas de tráfico que han surgido como consecuencia del crecimiento poblacional y la expansión de la ciudad de Ambato.

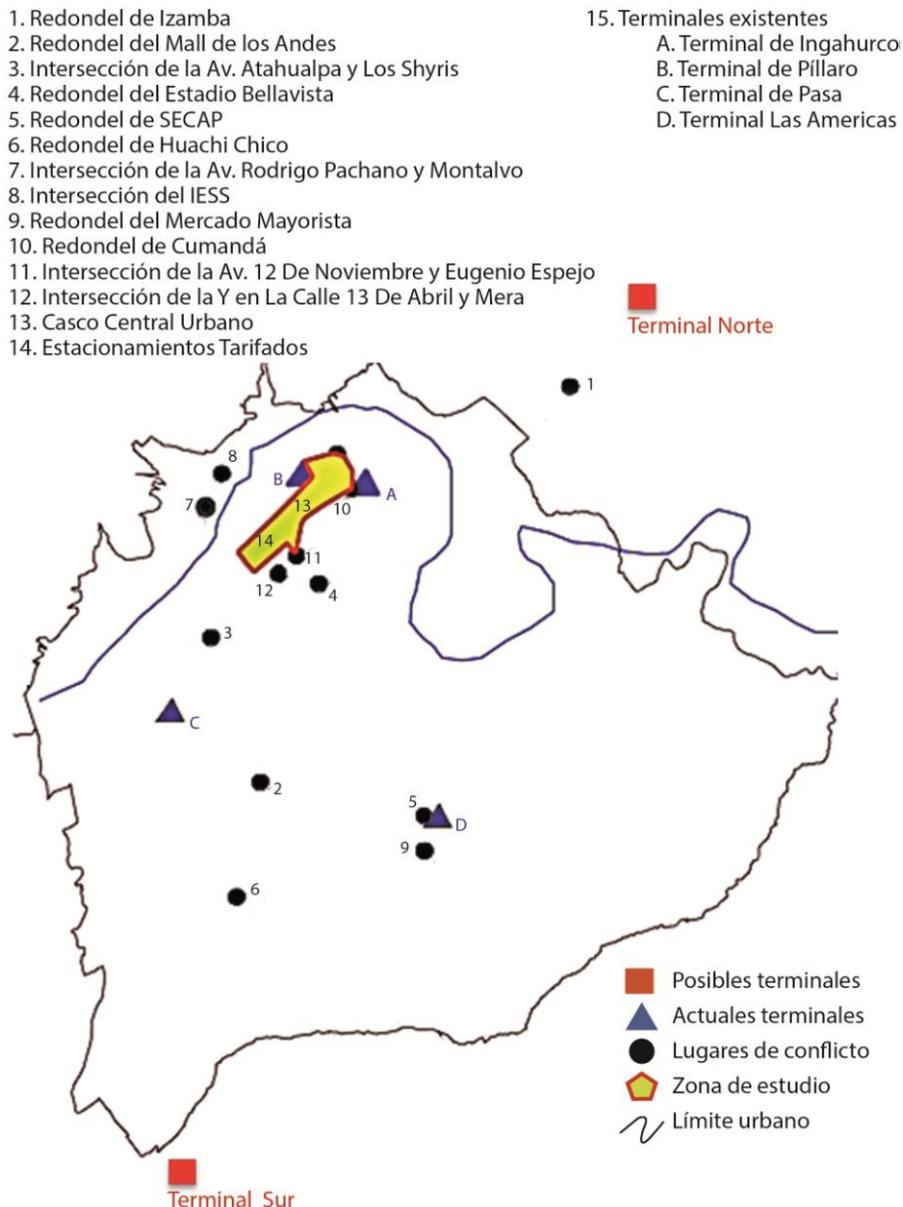
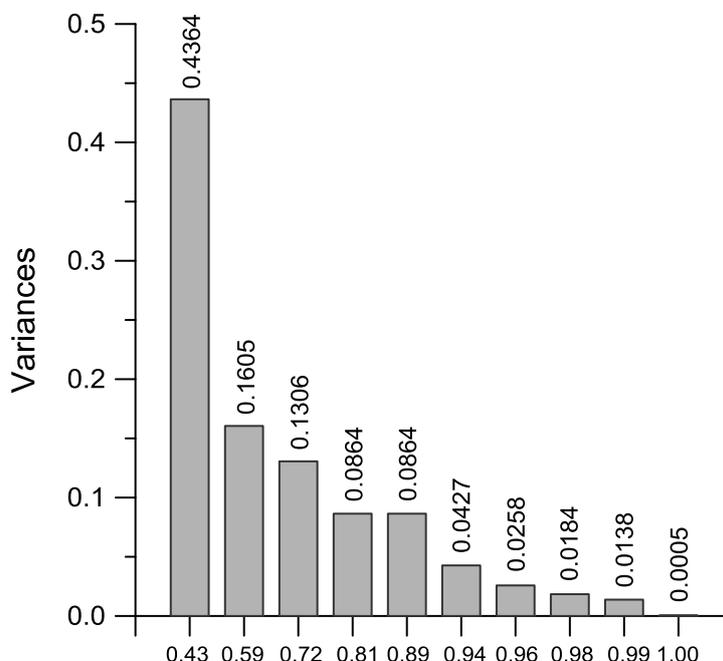


Figura 2. Mapa de localización de puntos de conflicto de tráfico en Ambato.



de determinar los nodos de mayor influencia dentro de la red ejemplo, se ha realizado un ACP sobre datos disponibles de la misma. De esta manera, se pueden establecer los nodos de mayor influencia en esta sección de red y establecerlos como nodos (componentes) principales.

La 0 contiene los resultados del ACP, que incluye proporciones de varianzas explicadas por las componentes principales. En este caso, parece razonable quedarse con las tres primeras componentes principales, ya que con ellas se explica un 72,75% de la varianza, el resto de componentes aporta menos del 10% cada una. La matriz de cargas resultante para las componentes elegidas se muestra en la 0.



**Figura 4.** Gráfico de barras de las varianzas explicadas por componentes principales.

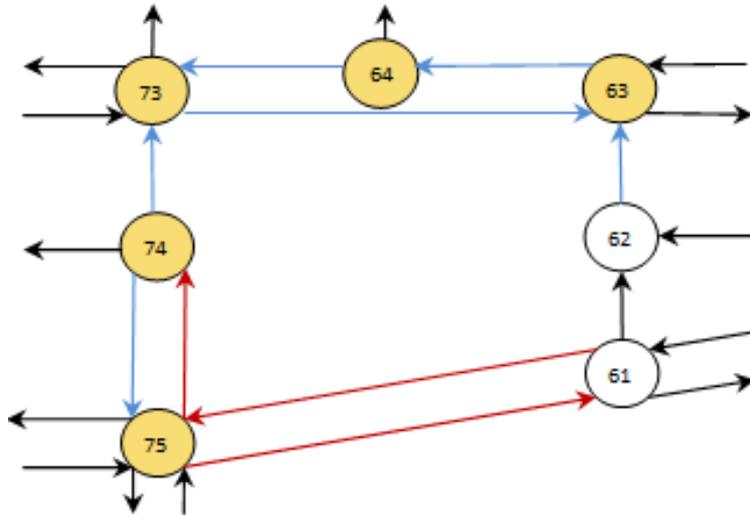
**Tabla 1.** Matriz de resultados de las componentes principales elegidas.

Arco	PC1	PC2	PC3
X61.75	0,24	0,50	-0,11
X75.61	0,28	0,08	0,62
X75.74	0,39	0,18	0,31
X74.75	-0,32	0,24	-0,11
X62.74	-0,08	0,72	0,03
X74.73	-0,22	0,31	0,09
X73.63	-0,31	0,17	-0,33
X64.73	-0,40	0,01	0,44
X63.64	-0,41	-0,01	0,42
X62.63	-0,35	-0,10	0,12

Para poder interpretarlos mejor, se presenta la siguiente gráfica de la red ejemplo con flechas de color azul para cargas negativas, rojas para cargas positivas y las aproximadas a cero no se grafican, a partir de la matriz de datos de la 0.

Como se puede observar en la 0, la primera componente tiene una relación positiva con los arcos del nodo 75, lo que significaría que existe una gran demanda vehicular en ese nodo, 3 de los 4 arcos tienen alta circulación vehicular que influye en la red y el arco restante solo actúa como vía de salida de la red. Además, mantiene relación negativa alta con el resto de nodos, lo que sugeriría que los vehículos que circulan por el resto de nodos provienen de otras entradas a la red y que el nodo 75 actúa como nodo de salida.

Por su parte, la segunda componente principal según la matriz de resultados, guarda alta relación positiva con ocho de los diez arcos. Por lo que respecta a correlaciones negativas son valores cercanos a 0, al igual que un par de los valores positivos, por lo que no se les ha tomado en cuenta al analizar la componente. Se podría decir entonces, que en su mayoría guarda relación positiva, especialmente con los arcos de entrada y salida de los nodos 74 y 75, indicando así, que en estos arcos existe un alto flujo vehicular y son potenciales puntos conflictivos a tomar en cuenta. Finalmente, la tercera componente tiene alta correlación con los datos que se refieren a movimientos hacia el nodo 73.



**Figura 5.** Red ejemplo - primera componente.

Se podría concluir que la red ejemplo se ha reducido a 3 variables que interpretan lo que está sucediendo dentro de la misma, en especial hacia y desde los nodos 75 y 73, que serían los más relevantes desde el punto de vista de la variabilidad del tráfico, sugiriendo que son las zonas que requieren mayor atención por tener mayor influencia dentro de la red.

### 3.2. Modelos de predicción

#### Series temporales

El problema principal de este artículo es el de predicción a corto plazo del tráfico en las calles de Ambato. Se pueden observar en la 0 las líneas de tendencia y comportamiento de cada uno de los arcos de la red ejemplo en las tres bandas horarias, lo que ha proporcionado información valiosa que ha ayudado a seleccionar los modelos de predicción adecuados. Por esta razón, se ha creído conveniente aplicar los modelos dinámicos lineales (MDLs) para crear un modelo de predicción de flujo vehicular en los arcos de la red objeto de estudio. West & Harrison (2005) y Petris *et al.* (2009) proporcionan introducciones a los MDLs.

#### Modelos dinámicos lineales

La modelización matemática de procesos de series temporales se basa en modelos dinámicos, refiriéndose el término dinámico a cambios en tales procesos debidos al paso del tiempo como fuerza motriz fundamental. Los modelos lineales clásicos se escriben habitualmente en términos de la ecuación:

$$Y = F'\theta + v$$

donde  $Y$  es el vector respuesta,  $F'$  es la matriz de variables regresoras o independientes,  $\theta$  es un vector de parámetros desconocidos y  $v$  es el vector de errores.

Si se quiere dar un sentido dinámico o evolutivo al sistema anterior, se han de poder variar los elementos del modelo con el paso del tiempo  $t$  y permitir que el conjunto de parámetros  $\theta$  evolucione, a su vez, con el tiempo. La evolución toma la forma de un proceso de primer orden de Markov. De este modo, se podría escribir un modelo lineal dinámico (MDL) normal general según:

$$\begin{aligned} Y_t &= F_t \theta_t + v_t & v_t &\approx N_m(0, V_t) \\ \theta_t &= G_t \theta_{t-1} + w_t & w_t &\approx N_p(0, W_t) \\ \theta_0 &\approx N_p(m_0, C_0) \end{aligned}$$

que vendrá caracterizado por:  $\{F_t, G_t, W_t, V_t\}$ , donde, para cada instante de tiempo  $t$ ,  $F_t$  es un vector conocido de dimensión  $n \times 1$ ,  $G_t$  es una matriz conocida  $n \times n$ ,  $V_t$  es una varianza conocida y  $W_t$  es una matriz de varianzas conocida  $n \times n$ .

El modelo específico a utilizar es un MDL de crecimiento lineal, que es un modelo de espacio de estados con:

$$\begin{aligned} Y_t &= \mu_t + v_t & v_t &\approx N(0, V) \\ \mu_t &= \mu_{t-1} + \beta_{t-1} + w_{t,1} & w_{t,1} &\approx N(0, \sigma_\mu^2) \\ \beta_t &= \beta_{t-1} + w_{t,2} & w_{t,2} &\approx N(0, \sigma_\beta^2) \end{aligned}$$

Cuando  $\beta$  es igual o está muy concentrado en 0, el modelo lineal polinómico es de orden 1 (como en el arco 74-73, por la mañana). Caso contrario, es de orden 2 (como en el arco 75-61, horario en la tarde). En los MDLs permiten modelizar rasgos típicos en series temporales como tendencias (polinómicas), regresión y efectos estacionales, véase Petris *et al.* (2009).

#### Aplicación de los MDLs a la red ejemplo

En la 0 se puede visualizar las líneas de tendencia, marcadas con color azul, las mismas que sugieren si el nivel del polinomio es de primer o segundo orden. Esto nos ayuda a determinar uno de los principales parámetros para obtener valores mediante la aplicación del modelo dinámico lineal (MDL) de predicción.

Se toma como ejemplo los datos del arco 75-61 representados en la 0, ya que según sus líneas de tendencia en el horario de la mañana es de segundo orden, mientras que en los horarios del mediodía y tarde y noche son de primer orden. Los valores para  $W$  y  $V$  utilizados en el MDL se han determinado por máxima verosimilitud; el valor inicial de  $m_0$  es igual a la media del vector de datos de la banda horaria correspondiente y la  $C_0$  inicial, la varianza de los mismos. Se ha aplicado el MDL mencionado en R, y se han obtenido los siguientes modelos y gráficos:

#### ***Horario de la mañana (6:45 - 7:00 - 7:15 - 7:30 - 7:45 - 8:00 - 8:15 - 8:30 - 8:45)***

Se puede observar en la 0, en el primer cuadro la gráfica de dispersión de los datos de la mañana. El segundo muestra la función de autocorrelación que sugiere la línea de tendencia de orden 2 indicada en la 0 para el arco 75-61 en el horario de la mañana.

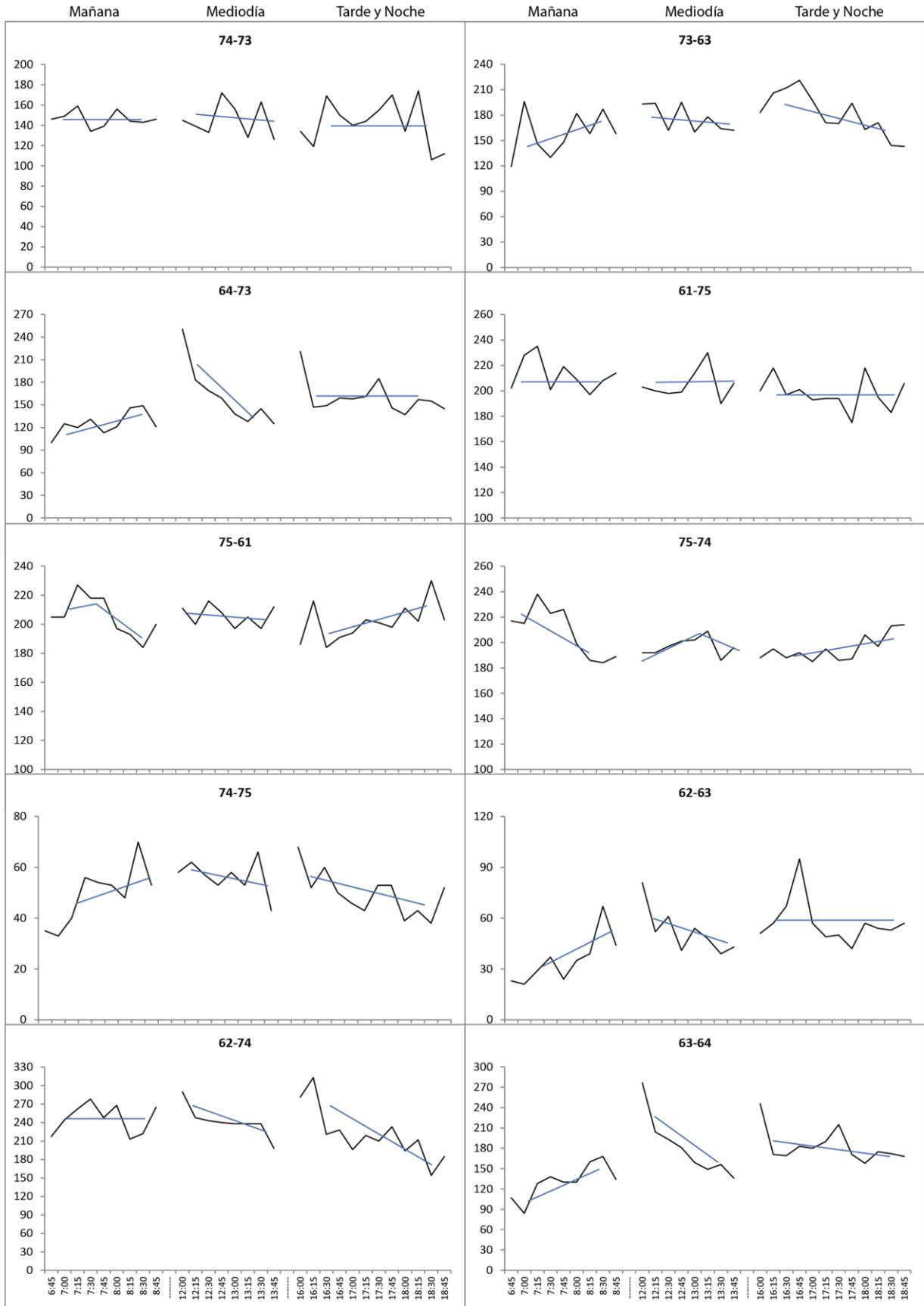
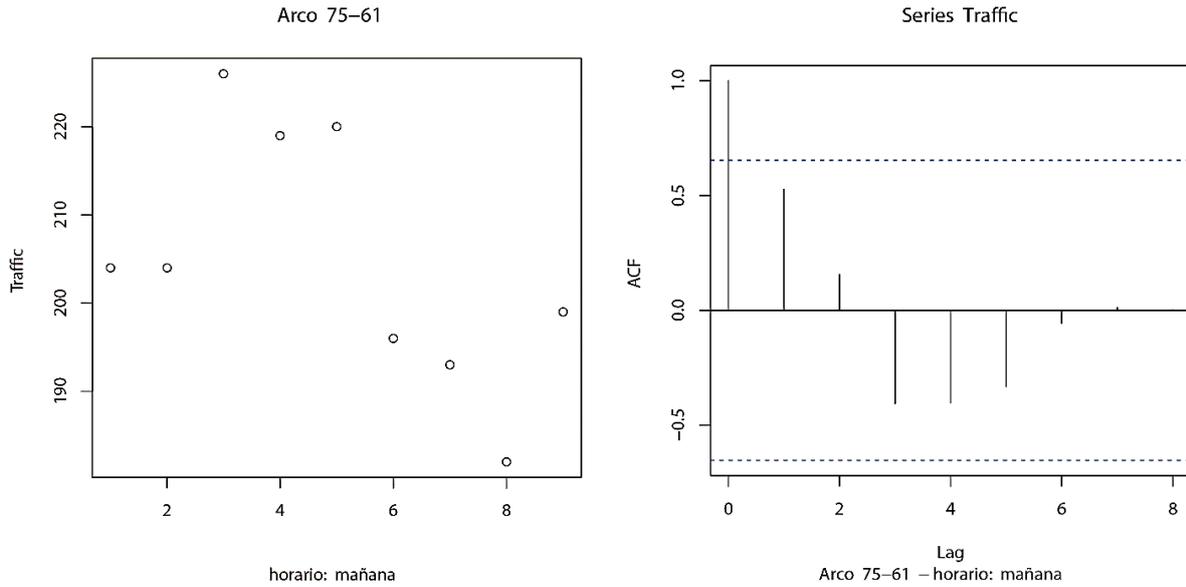
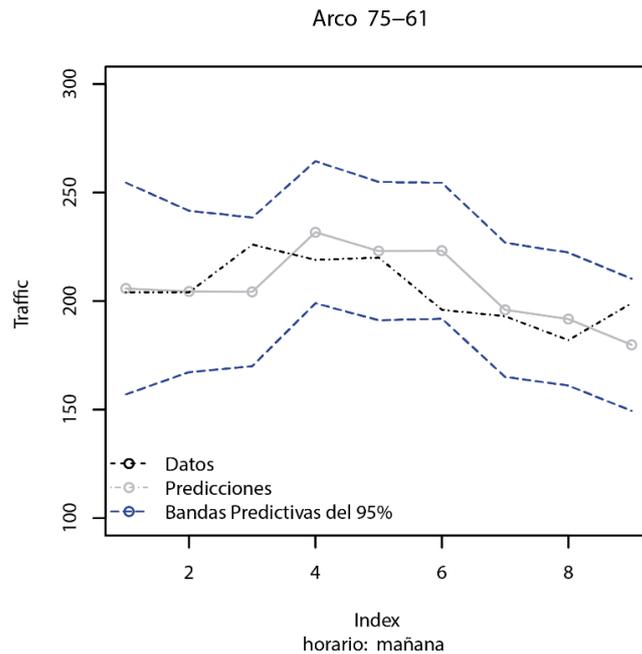


Figura 6. Gráfico de series temporales de los arcos de la red ejemplo.



**Figura 7.** Gráfica de datos y ACF (mañana).

En la 0 se muestran los valores predichos marcados en color gris que siguen una tendencia similar a los valores originales en color negro, con un buen ajuste.



**Figura 8.** Datos y gráfica de datos obtenidos al aplicar el DLM (mañana).

Como se puede observar en las 0 y 0, el MDL genérico utilizado se ajusta de manera satisfactoria para predecir las siguientes cantidades de vehículos que posiblemente circulen en los siguientes períodos de tiempo. De manera similar y bajo las mismas condiciones se aplican al resto de arcos y así predecir a 30, 45, 60, ...,  $n$  minutos.

Predicción de la saturación

Uno de los usos más relevantes del MDL anterior es el de la predicción de la saturación en las correspondientes vías de la red. Se define como capacidad de una vía a la máxima intensidad horaria de personas o vehículos al atravesar un tramo uniforme de un carril o calzada durante un período definido de tiempo bajo las condiciones prevalecientes viales, el tráfico y los sistemas de regulación (National Academy of Science, 2000).

Para hacer el cálculo de flujo máximo en cada arco, considerando que la capacidad de un carril es el máximo número de vehículos que puede pasar por él, suponiendo una velocidad uniforme. Generalmente, se expresa en vehículos/hora. Entonces la capacidad en vehículos por hora sería:

$$C = \frac{v}{s} 1000$$

donde  $C$ : capacidad máxima de un carril,  $v$ : velocidad en km/h,  $s$ : separación media mínima en metros entre las partes frontales o traseras de dos vehículos sucesivos, para determinar la velocidad. El valor de  $s$  está en función de la longitud de los vehículos, del tiempo de reacción de los conductores y de la distancia de frenado, pudiendo expresarse en función de  $v$  mediante una fórmula del tipo:

$$s = a + bv + cv^2$$

El término independiente ( $a$ ) corresponde a la longitud de los vehículos, el término ( $bv$ ) al tiempo de reacción de los conductores y ( $cv^2$ ) a la distancia de frenado. En un estudio realizado en Inglaterra por Smeed & Bennet (1949), encontró la siguiente fórmula para la separación más frecuente en función de la velocidad:

$$s = 8 + 0.2 v + 0.003 v^2$$

Reemplazando  $s$  en la fórmula de la capacidad  $C$ , tendríamos:

$$C = \frac{v}{8 + 0.2 v + 0.003 v^2}$$

Cuando la velocidad en marcha de vehículo se encuentra por debajo de 25km/h se vuelve intolerable para el conductor, por lo que hemos considerado ocupar el mínimo tolerable para conducir. Por lo tanto,  $v = 25$  km h-1 y  $C = 1681$ vehículos/hora. Así, obtendríamos que para cada 15 min para arcos con un carril, el flujo máximo es de 420, y el 70% de su capacidad sería 294, información necesaria ya que al sobrepasar ese porcentaje empieza a existir problemas de saturación. Las probabilidades de saturación se calculan mediante:

$$\Pr(Z > 0.7f)$$

donde  $Z$  es la distribución predictiva del MDL correspondiente.

Luego de determinar los valores de probabilidad para cada arco, se observa en la 0, en el primer cuadro indica que en el arco 62-63 se tiene una probabilidad muy baja de saturación, pues el valor máximo que alcanza es de 0,5 en los dos primeros cuartos de hora del horario de la mañana y en el resto de períodos de medición de flujos vehiculares la probabilidad es cercana a 0. Respecto al arco

62-74, se puede observar todo lo contrario, en los dos primeros períodos de tiempo la probabilidad de saturación es superior al 50%, mientras que en el resto de los períodos indica que posiblemente siempre este saturado, con una probabilidad cercada a 1. Esto sugeriría la necesidad de interactuar en tal tráfico, a través de servicio público, limitaciones de tráfico y otras medidas similares.

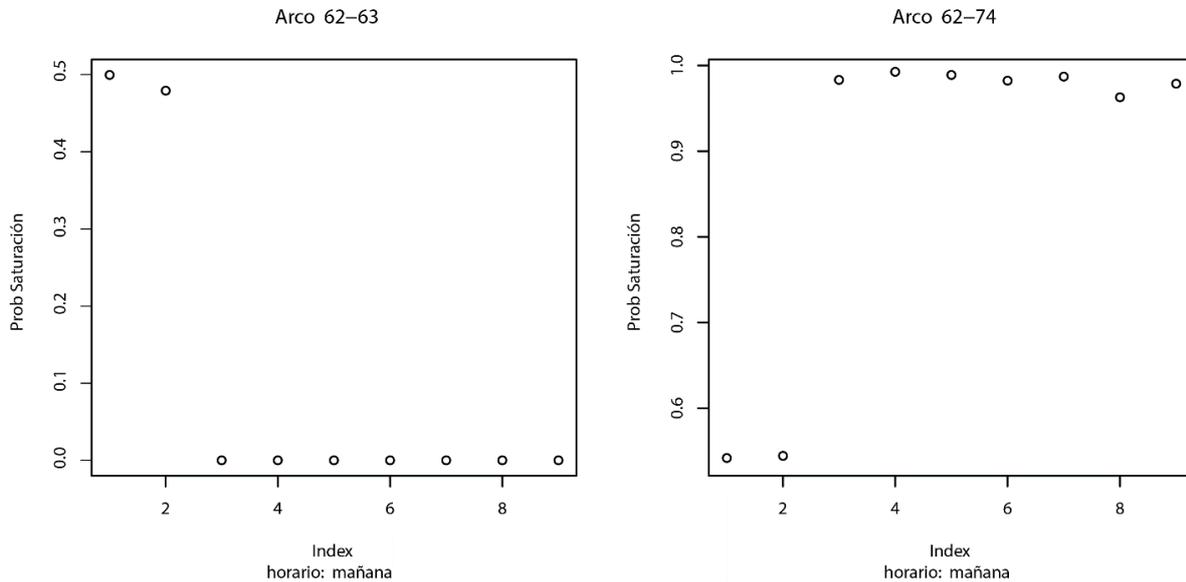


Figura 9. Gráfico de probabilidades de saturación.

#### 4. CONCLUSIONES

Tras aplicar el ACP a la red de estudio se determinan varios de los denominados puntos calientes o de mayor incidencia en el flujo vehicular. Por tanto, los nodos en los que hay que poner mayor cuidado en el momento de tomar decisiones respecto a la planificación del tráfico vehicular. Otra alternativa que ofrecen estos puntos es ayudar a determinar los posibles lugares claves en donde se pueden colocar dispositivos de conteo de vehículos para obtener un histórico de datos del tráfico en la ciudad y así lograr las predicciones de tráfico con un menor margen de error aplicando los DLMs.

Los valores de probabilidad de saturación que se obtienen, ayudan a determinar la posibilidad de que se produzcan problemas de congestión en los diferentes períodos de tiempo, con lo que se pueden tomar las medidas correctivas necesarias para evitarlos. Por ejemplo, ubicar semáforos, eliminar carriles de estacionamiento, cambiar el sentido de los arcos en ciertos horarios o permanentemente, etc., y así permitir que el flujo vehicular sea óptimo y por ende evite el congestionamiento en lugares estratégicos.

A partir del modelo de predicción proporcionado por los MDLs en los puntos de medición de tráfico, se pretende introducir el concepto de matrices O-D dinámicas, para predecir las rutas principales en la ciudad. El concepto de matriz O-D estática puede verse, p.ej. en Vardi (1996). Teniendo así que acoplar a un modelo de simulación para experimentar distintas medidas mejora del mismo.

#### AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros sinceros agradecimientos al Gobierno Autónomo Descentralizado - Municipalidad de Ambato, por la ayuda brindada en la recopilación de datos, mismos que sirvieron

para la realización de este estudio. De la misma manera, extendemos nuestros agradecimientos a la Universidad Técnica de Ambato por el apoyo brindado en la parte técnica-científica.

## REFERENCIAS

- Acevedo, J., 2011. *Estudio de Ingeniería de Tránsito para la semaforización centralizada en el casco urbano de la Ciudad de Ambato*. Ilustre Municipio de Ambato, UMTA, Ambato.
- Akcelik, R., 1981. *Analysis traffic signals: Capacity and timing*. Australian Road Research Board, ARRB Group Limited, Vermont South, Victoria 3133, Australia.
- Banks, J., 1998. *Handbook of simulation: Principles, methodology, advances, applications and practice*. EMP Books, Atlanta, Georgia, USA.
- Barceló, J., 2010. *Fundamentals of traffic simulation*. Springer Verlag, California, USA.
- Castillo, E., A.J. Conejo, P. Pedegral, R. García, N. Alguacil, 2002. *Formulación y resolución de modelos de programación matemática en ingeniería y ciencia*. Alfaomega Grupo Editor, México DF, 574 pp.
- Fernandez, R., E. Valenzuela, 2004. Gestión ambiental de tránsito: Cómo la ingeniería de transporte. *Eure*, 29(89), 97-107.
- Hair, J., R. Anderson, R. Tatham, 1987. *Multivariate data analysis*. Macmillan Publish. Company, New York, USA.
- Head, K.L., 1995. Event-based short-term traffic flow prediction model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 46-52.
- IHT, 1997. *Transport in the urban environment*. The Institution of Highway and Transportation, London, UK.
- Lee, S., D.B. Fambro, 1999. Application of subset autoregressive integrated moving average model for short-term freeway traffic volume forecasting. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 179-188.
- National Academy of Sciences, 2000. *Highway capacity manual (HCM2000)*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1207 pp.
- Nel-lo, O., 1998. Los confines de la ciudad sin confines. Estructura urbana y límites administrativos en la ciudad difusa. En: J. Monclús (Ed.). *La ciudad dispersa. Suburbanización y nuevas periferias*. Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona, pp. 35-57.
- Okutani, I., Y.J. Stephanedes, 1984. Dynamic prediction of traffic volume through Kalman filtering theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, pp. 1-11.
- Petris, G., S. Petrone, P. Campagnoli, 2009. *Dynamic linear models with R*. Springer Verlag, New York, 186 pp.
- Smeed, R., G. Bennett, 1949. Research on road safety and traffic flow. *ICE Engineering Division Papers*, 7(3), 1-38.
- Stathopoulos, A., M.G. Karlaftis, 2003. A multivariate state space approach for urban traffic flow modeling and prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 121-135.
- Taha, H.A., 2004. *Investigación de operaciones*. Pearson Educación, México.
- Tebaldi, C., M. West, 1998. Bayesian inference on network traffic using link count data. *Journal of the American Statistical Association*, 93(442), 557-573.
- Vardi, Y., 1996. Network tomography: Estimating source-destination traffic intensities from link data. *Journal of the American Statistical Association*, 91(433), 365-377.
- Voort, M.V.D., M. Dougherty, S. Watson, 1996. Combining kohonen maps with arima time series models to forecast traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4, 307-318.

- West, M., J. Harrison, 2005. *Bayesian forecasting and dynamic models*. Springer Verlag, New York, USA.
- Williams, B.M., L.A. Hoel, 1999. *Modeling and forecasting vehicular traffic flow as a seasonal ARIMA process: Theoretical basis and empirical results*. Ph.D.-dissertation, Dept. Civil Eng., University of Virginia, Virginia, USA.
- Willumsen, L., 1978. *Estimation of an O-D matrix from traffic counts - A review*. Institute of Transport Studies, University of Leeds, UK.
- Yu, G.Q., J. Hu, C. Zhang, L. Zhuang, J. Song, 2003. *Short-term traffic flow forecasting based on Markov chain model*. IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, pp. 208-212.