

Movilidad población: aplicación informática cubana para la planificación del transporte

MSC. ZUNILDA PARRA ARIAS
Investigador Auxiliar, Cimab
zunilda@cimab.transnet.cu

ING. LEVIAN LARA GÓMEZ
Aspirante a Investigador, Cimab
levian@cimab.transnet.cu

LIC. IDALMI PADILLA MAGDALENO
Investigador Agregado, Cimab
idalmis@cimab.transnet.cu

Palabras clave: modelos de transporte, planeamiento
Key words: transport models, planning

Resumen

MovilidadPoblación fue desarrollado con el objetivo de contar con una aplicación que permita la captación y procesamiento de la información de la encuesta de movilidad así como la pro-

gramación de los distintos modelos matemáticos relacionados con la generación/atracción de viajes, distribución de viajes, división modal y asignación de tráfico.

Abstract

MovilidadPoblación was developed with the goal to count on an application that allows capture and processing information from the survey of mobility as well as programming

of different mathematical models related to the generation / attraction trip, trip distribution, modal split and traffic assignment.

Introducción

La disponibilidad de información cuantitativa, fiable y actualizada relativa a las características de la demanda de transporte es fundamental para tomar decisiones eficaces y oportunas con respecto a la gestión, planificación y expansión de sistemas de transporte preferentemente urbano.

En el contexto actual, el disponer de modelos eficientes de previsión de la demanda y su asignación a la red, es fundamental no sólo para planificar actuaciones en transporte público y privado, sino también para medir y evaluar proyectos tanto de inversión como de gestión y sobre todo para conocer, mediante simulación, los posibles movimientos de todos los vehículos tanto en la situación actual como en las posibles situaciones futuras consistentes en la puesta en marcha de los diferentes planes de actuación.

Las encuestas de movilidad aportan información básica e indispensable para la formulación y estimación de los modelos que son utilizados en la simulación de sistemas y cuyo objetivo final comprende, por una parte, la detección, diseño y evaluación económica de proyectos de inversión y, por otra, la obtención de resultados coherentes que constituyan información relevante y consistente a la hora de decidir sobre políticas de transporte.

De lo anterior radica la importancia de realizar correctamente las encuestas, ya que la información obtenida a partir de ellas, será fundamental para alimentar a los modelos a utilizar. Posteriormente, con los modelos estimados y los resultados obtenidos es posible obtener indicadores, que permitan a los decisores tomar medidas de planificación global de los sistemas de Transporte.

En el 2013 se inició la «Investigación de la Movilidad de la Población de La Habana», la cual permite obtener información sobre los movimientos de la población, y facilita organizar y planificar mejor los servicios de transporte público de pasajeros en la ciudad, con los recursos disponibles y evaluar el sistema de transporte actual con el objetivo de propiciar nuevos sistemas para lograr una mejor movilidad de la población en la Capital.

Por todo lo expresado anteriormente surge la necesidad de desarrollar una herramienta automatizada que permita procesar las encuestas de movilidad y aplicar los modelos de cuatro etapas de planificación del transporte.

Materiales y métodos

La metodología utilizada para la identificación de la demanda futura consta de las siguientes etapas, comunes de demanda directa o modelo secuencial de demanda según (Ampt y Ortúzar, 2004; Burton Michael, 1979; Cambridge, 1996; Stopher et al, 2003 y Ortuzar y Willumsen, 2011):

- Modelo de generación de viajes
- Modelo de distribución de viajes
- Modelos de división modal
- Modelos de asignación de tráfico por rutas

En general estos elementos estarán interrelacionados en la forma en que se indica en la Figura 1.

- *Generación de viajes:* La etapa de generación de viajes dentro del proceso de planificación del transporte tiene que ver con la predicción de los futuros viajes de vehículos o personas por cada zona de tráfico o combinación de estos. En esta etapa se desarrolló el método del análisis de regresión lineal múltiple

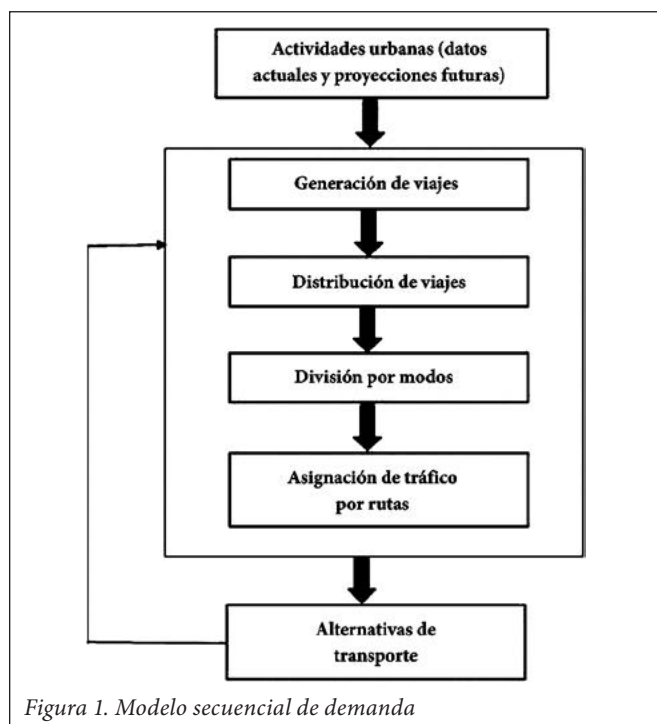


Figura 1. Modelo secuencial de demanda

- **Método del análisis de regresión lineal múltiple:** Para cada zona de transporte se debe determinar las tasas de generación de viajes a través de la regresión lineal múltiple, determinando las variables que influyen en la generación de viajes. Se obtiene la Ecuación 1:

$$y = k + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$$

Ecuación 1. Regresión lineal múltiple

Donde:

Y: Variable dependiente (el tráfico expresado como viajes personales, o viajes por modo o propósito de vehículos o personas).

x_1, \dots, x_n : Son las variables independientes que recogen el efecto del uso del suelo y los elementos socio-económicos.

b_1, \dots, b_n : Son los coeficientes de las variables independientes respectivas

Ejemplo:

x_1 : Número de unidades de vivienda

x_2 : Número de personas empleadas

x_3 : Propiedad de vehículos

x_4 : Distancia al centro de ciudad

y : Número de viajes

- **Distribución de viajes:** La etapa de distribución de viajes tiene como propósito el relacionar un número dado de orígenes de viajes para cada zona del área de estudio a un número dado de destinos localizados dentro de las zonas del área.

Los métodos utilizados son los siguientes:

- **Método del factor uniforme:** Se calcula el factor de crecimiento para el área en su conjunto que se va multiplicando por los movimientos actuales entre las zonas para obtener así el intercambio futuro.

Matemáticamente puede expresarse mediante la Ecuación 2:

$$T_{ij} = t_{ij} \times F$$

Ecuación 2. Fórmula general del factor uniforme

$$\text{Donde: } F = \frac{T}{t}$$

T_{i-j} : Número futuro de viajes desde la zona i y la zona j

t_{i-j} : Número actual de viajes desde la zona i a la j (Matriz Origen-Destino)

T: Total de viajes futuros en el área bajo estudio según la fase de generación.

t: Total de viajes actuales en el área bajo estudio

- **Método del factor promedio:** Este método utiliza un factor de crecimiento para cada zona dentro del área bajo de estudio, el cual se obtiene a partir de las predicciones en uso de suelo y generación de viajes para cada zona. Matemáticamente estos pueden ser explicados por la Ecuación 3:

$$T_{i-j} = t_{i-j} \times \frac{(F_i + F_j)}{2}$$

Ecuación 3. Método factor promedio

$$\text{Donde: } F_i = \frac{T_i}{t_i} \text{ y } F_j = \frac{T_j}{t_j}$$

T_{i-j} : Número futuro de viajes desde la zona i y la zona j

t_{i-j} : Número actual de viajes desde la zona i a la j (Matriz Origen-Destino)

F_i y F_j : Factores de crecimiento para la zona i y la j, respectivamente

T_i y T_j : Total de viajes futuros originados en i o con destino j.

t_i y t_j : Total de viajes actuales originados en i o con destino j.

En general, los valores calculados no dan el flujo total que se origina o termina en cada zona de acuerdo a las estimaciones futuras derivadas del análisis de generación.

- **Método de Fratar**

Matemáticamente este puede ser explicado mediante la Ecuación 4:

$$T_{ij} = t_{ij} \times F_i \times F_j \times \frac{L_i + L_j}{2}$$

Ecuación 4. Método de Fratar

Donde:

T_{ij} : Número futuro de viajes desde la zona i y la zona j

t_{ij} : Número actual de viajes desde la zona i a la j (Matriz Origen-Destino)

F_i y F_j : Factores de crecimiento para la zona i y la j, respectivamente

L_i y L_j : Factores de localización en la zona i y de la zona j, respectivamente. Ecuaciones 5 y 6:

$$L_i = \frac{t_i}{\sum_{j=1}^n t_{ij} \times F_j}$$

Ecuación 5. Factor de localización en la zona i.

$$L_j = \frac{t_j}{\sum_{i=1}^n t_{ij} \times F_i}$$

Ecuación 6. Factor de localización en la zona j.

Al aplicar la predicción sucede lo mismo que en el método anterior, es decir, que no hay coincidencia entre lo previsto para la generación y los totales calculados lo que lleva a un proceso iterativo de calcular nuevos factores de crecimiento y valores L_i y L_j . Ecuación 7:

Donde:

$$T_{ij}^{(p,q)} = t_{ij}^{(p,q)} \times F_i^{(p)} \times F_j^{(q)} \times \frac{L_i^{(p)} + L_j^{(q)}}{2}$$

Ecuación 7. Viajes futuros desde la zona i a la j.

$T_{ij}^{(p,q)}$: Viajes futuros desde la zona i a la j con propósito p en el origen y q en el destino.

$t_i^{(p)}$: Viajes con destino en i con el propósito p para el año base.

$t_{ij}^{(p,q)}$: Viajes entre las zonas i y j con propósito p en la zona y propósito q en el destino j, para el año de base.

$F_i^{(p)}$: Factor de crecimiento para la zona i, propósito p

$L_i^{(p)}$: Factor de localización para la zona i. (Ecuación 8)

$$L_i^{(p)} = \frac{t_i^{(p)}}{\sum_{j=1}^n t_{ij}^{(p,q)} \times F_j^{(q)}}$$

Ecuación 8. Nuevo factor de localización para la zona i

Se buscará mediante un proceso iterativo la concordancia entre el número de viajes atraídos que se calcule para cada zona y los previstos de acuerdo al estudio de la generación. La matriz O/D para la iteración (k + 1) viene dada por:

$$T_{ij}^{(k+1)} = t_{ij}^{(k)} \times F_i^{(k)} \times F_j^{(k)} \times \frac{L_i^{(k)} + L_j^{(k)}}{2}$$

Donde los índices p y q han sido suprimidos (Ecuación 9)

$$L_i^{(k)} = \frac{\sum_{j=1}^n T_{ij}^{(k)}}{\sum_{j=1}^n t_{ij} \times F_j^{(k)}} \quad T_{ij}^0 = t_{ij}$$

Ecuación 9. Nuevo factor de localización para la zona i en la k+1 iteración.

• Método de Detroit

Matemáticamente este puede ser explicado por la Ecuación 10:

$$T_{ij} = t_{ij} \times \frac{F_i + F_j}{F}$$

Ecuación 10. Método de Detroit

Donde:

T_{ij} : Número futuro de viajes desde la zona i y la zona j

t_{ij} : Número actual de viajes desde la zona i a la j (Matriz Origen-Destino)

F_i y F_j : factores de crecimiento para la zona i y la j, respectivamente

También en este caso es necesario realizar un proceso iterativo como el explicado anteriormente.

► **División por modos de transporte:** La asignación de viajes por modos diferentes de transporte debe entenderse como la definición de las proporciones del número total de viajes que tomarán uno u otro medio. Esto puede ser numéricamente expresado como una fracción, una razón u porcentaje del número total de viajes. El modelo desarrollado es el siguiente:

• **Modelos de redistribución:** Estos se aplican inmediatamente después de que se halla previsto para el futuro el total de viajes producidos y atraídos de acuerdo al paso de la generación de viajes. Este realiza aplicando la técnica de regresión lineal múltiple, cuya ecuación típica puede ser expresar por la Ecuación 11:

$$Y = A_0 + A_1 x \log X_1 + A_2 x \log X_2 + A_3 x X_3 + A_4 x X_4 + A_5 x X_5 + A_6 x X_6$$

Ecuación 11. Regresión lineal múltiple en modelo de redistribución

Donde:

y: porcentaje de viajes al trabajo por transporte público

x_1 : razón de tiempo de viaje ómnibus/auto

x_2 : razón costo de viaje ómnibus/auto

x_3 : propiedad vehicular

x_4 : índice del tamaño de la familia

x_5 : longitud del viaje

x_6 : porcentaje de mujeres empleadas del total de la población activa

► **Asignación del tráfico por rutas:** La asignación del tráfico se basa en la selección de la trayectoria de tiempo mínimo entre dos zonas. El método utilizado es el Todo o Nada.

En este método se supone que la trayectoria elegida por los vehículos que van desde una zona a otra es aquella de mínima resistencia. Aunque esta resistencia puede ser medida en términos de distancia, costo, tiempo o una combinación de estos factores, se escogió el tiempo como parámetro de medida. Para la determinación de la trayectoria de tiempo mínimo desde cada zona de origen a las restantes se empleó el método de camino mínimo.

Resultados

Descripción de la aplicación cubana

El sistema corre usando la arquitectura cliente-servidor mediante protocolo IP y está basado en el patrón de diseño Modelo-Vista-Controlador (MVC por sus siglas en Inglés) y compuesto por dos subsistemas, uno público y otro administrativo, ambos seccionados en varios módulos.

MovilidadHabana fue desarrollado sobre Linux OS y para ello se utilizaron las siguientes tecnologías: Servidor web Apache 2, Servidor de base de datos Mysql 5.5.8, PHP 5.3.5 y Mozilla firefox 5 con firebug plugin. Para la creación se utilizaron las siguientes herramientas: Netbeans IDE 7.0 como entorno de desarrollo integrado, Symfony como framework de PHP, JQuery como librería de JavaScript y Phpmyadmin como administrador de base de datos. Las tecnologías y herramientas utilizadas dan respuesta a las exigencias requeridas por la aplicación tanto para la programación de los diferentes modelos matemáticos y captura de la información (procesamiento de las encuestas) como para el manejo de las bases de datos.

Se crearon un grupo de tablas destinadas a almacenar la información primaria para crear el plan de transportación según el tipo de transportación. También disponer de nomencladores sobre zonas de transporte, municipios, ocupación, propósito del viaje, uso del suelo, encuesta, etc.

Para la creación del banco de datos con toda la información primaria requerida y consultar la base de datos creada se utilizó la aplicación MySQL y Phpmyadmin como administrador de base de datos. La aplicación incluyó además las herramientas para la compilación de la información registrada por diferentes criterios de selección y para la aplicación de operaciones lógicas y aritméticas necesarias en la elaboración del plan de transportación y los reportes requeridos.

El subsistema público es donde se encuentran los módulos principales de la aplicación que son:

- **Encuestas:** en este módulo se introducen los datos correspondientes a las encuestas, este está dividido en. Listado (se listan todas las encuestas), Encuestas (se introducen las encuestas con viajes) y Encuestas sin viajes.
- **Matrices:** aquí se obtienen las matrices de origen-Destino de las encuestas, los matrices origen-destino una vez expandida la muestra y las matrices de distancia, de tiempo de viaje, etc.
- **Modelos Matemáticos:** está dividido en los diferentes modelos de planeamiento: Generación de viajes, Distribución de viajes, división modal y asignación de tráfico. Estos a su vez están subdivididos por los diferentes métodos a aplicar en cada modelo.
- **Reportes:** Aparecen todos los resultados o reportes por zonas, viajes, movilidad, coeficientes, etc. Dichos módulos se muestran en la Figura 2:



Figura 2. Página de inicio.

En esta página también aparece el enlace a los nomencladores, este es el subsistema administrativo, es donde se muestran todos los nomencladores para la ocupación, zonas de transporte, distrito, área, sección, municipios, motivos de viaje, uso del suelo, edad, etc.

A continuación se muestran cada uno de estos módulos de forma detallada.

Para acceder a cada uno de ellos solo es hacer click encima de la pestaña de cada uno y se accede de forma rápida.

Módulo de Encuestas

En la Figura 3 aparece la ventana correspondiente a los datos de la encuesta donde el usuario declara los viajes realizados

En esta página los datos que se muestran son: Numero Cuestionario, Municipio (se selecciona el Municipio de encuesta), Área muestral, Distrito, Sección, Vivienda No., Persona No., Sexo, Edad, Ocupación, Persona No., Vehículo propio, Vehículo asignado, Ingresos familiar, Día de la semana, Propósito del viaje, Tipo de lugar origen, Tipo de lugar destino, Origen/Destino, Distancia total recorrida a pie.

Figura 3. Página de introducción de encuesta con viajes



Figura 4. Ventana de Reportes

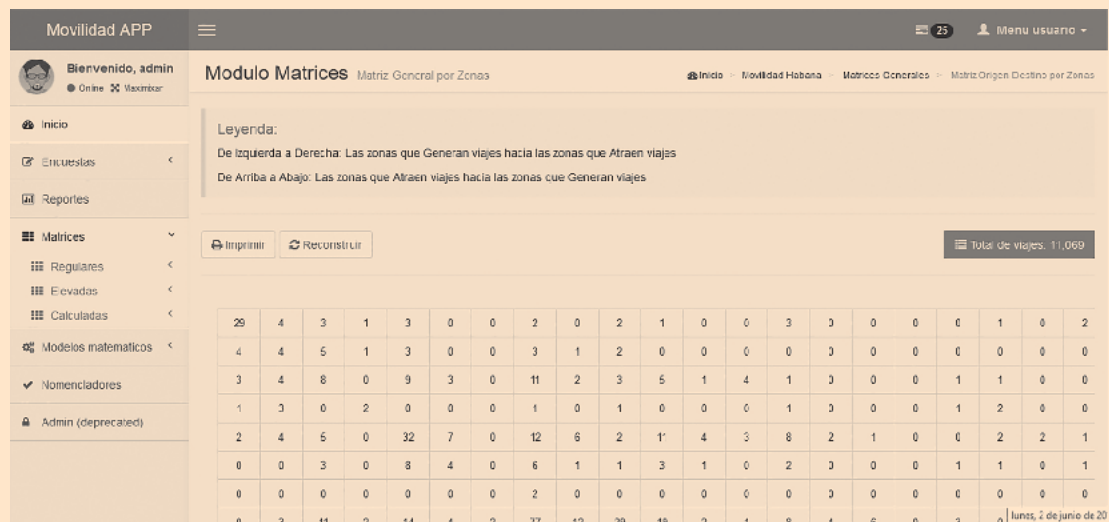


Figura 5. Módulo de matrices.



Figura 6. Modelos de regresión lineal múltiple.

En la sección Subviajes los datos corresponden a los medios de transporte que se utilizan para dar el viaje: Origen/Destino, Medios de transporte utilizados, Hora Salida, Hora llegada y Acompañantes.

Al final aparecen tres botones, uno para añadir viaje, añadir subviajes (movimientos) y para adicionar la encuesta.

En esta ventana solamente se muestran los viajes de la vivienda y persona encuestada.

Módulo de Reportes

Este módulo contiene los reporte o salidas del sistema, se puede acceder en las pestañas correspondiente a cada categoría y a su vez acceder a cada reporte.

En la Figura 4 se muestra la ventana principal de este módulo.

Módulo de Matrices

En este módulo se obtienen las matrices por zonas de transporte y municipios (Figura 5), obtenidas de la muestra y las calculadas a nivel de ciudad, así como las matrices de distancia y tiempos de viajes.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de la matriz por zonas

Modelos matemáticos

En este módulo se obtienen los resultados de los modelos de planeamiento de transporte aplicando diferentes métodos, a cada uno de ellos se accede haciendo click en cada una de la pestaña correspondiente al método en el lado izquierdo de la ventana.

En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la aplicación del método de regresión lineal en el módulo de Generación de Viajes.

Discusión

La planificación del transporte y el modelaje de la demanda de los viajes requería hasta hace más de 20 años que el ingeniero o planificador pasara meses desarrollando y probando redes de transporte. Más adelante estas redes se combinaban con la información de uso del suelo, para que los expertos en planificación procesaran la información para el modelaje. El procesamiento de la información se hacía con grandes equipos sofisticados y los resultados se presentaban en cientos de hojas impresas de computadoras.

Ahora, con el apoyo de las microcomputadoras se redujeron los tiempos y costos en el procesamiento de la información por medio de sistemas de análisis interactivos que integran los avances más recientes de gráficas de asignación de viajes de transporte público. Con estas nuevas herramientas se puede participar directamente y de manera inmediata dentro del proceso de planificación, sin grandes conocimientos de computación, una vez que la base de datos se establece, visualizando la información básica y los resultados de cálculos en forma gráfica o en listados.

En los años setentas la Federal Highway Administration creó el paquete de software denominado UTPS (Urban Transportation Planning System), este fue orientado utili-

zando grandes equipos (IBM 360-375) que contaba con una reducida capacidad gráfica y la cantidad de información requerida provocaba un desaliento de los técnicos para utilizar este paquete.

Ahora con el uso de microcomputadoras se han elaborado programas de cómputo orientados a la planeación de los transportes urbanos donde el tiempo requerido para una corrida de 12 horas se redujo solo 10 ó 15 minutos, y se cuentan con menús gráficos, lenguajes más simples de comunicación entre los usuarios y la máquina, interfaces de graficación y un fácil manejo en la entrada de base de datos y características de la red.

Estos nuevos paquetes comerciales son sistemas que incorporan gráficas en pantalla, edición y administración de base de datos, comandos simples con órdenes orientadas a los usuarios y facilidades para el análisis de situaciones.

Además la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite intercambiar la información con empresas de transporte y dependencias de gobierno, lo que llevará hacia una verdadera evaluación de políticas de transporte urbano y sus impactos con el uso del suelo y el medio ambiente. Entre los paquetes que existen en el mercado se destacan los siguientes: MOTORS, EMME/2, TRANUS, TRANSCAD, MANTRA, entre otros.

Los diferentes paquetes desarrollados se basan en la combinación de datos, redes, escenarios, matrices y funciones. Una determinada red de transporte de la región estudiada se representa por una red multimodal, donde sus principales componentes son los diferentes medios de transporte, la red básica, las intersecciones y las rutas de transporte público. Toda esta información puede modificarse en cualquier momento utilizando los editores gráficos interactivos y las facilidades de los módulos de cálculos.

Conclusiones

El software desarrollado permite procesar y obtener los resultados de las encuestas de movilidad y la aplicación de los modelos de planeamiento.

La aplicación es un primer acercamiento a softwares similares a nivel internacional.

Referencias

- Ampt E.S y Ortúzar, J. de D. (2004). On Best Practice in Continuous Large-Scale Mobility Surveys. *Transport review* 24(3), 337-363.
- Bruton M. J. (1979). *Introdução ao planejamento dos transportes*. São Paulo, Brasil: Editora Interciência e editora da Universidades de São Paulo.
- Cambridge Systematics Inc. (1996). *Travel Survey Manual*.
- Ortúzar, J. de D. y Willumsen, L.G. (2011). «Modelling transport», Fourth Edition, John Wiley and Sons, Chichester.
- Stopher, et al (2003). *Standards for household travel surveys-some propose ideas*, International Conference on Transport Survey Quality and Innovation.

