
AVANCES RECIENTES EN LA MODELACION INTEGRADA DE USOS DEL SUELO Y TRANSPORTES MULTIMODALES

T. de la Barra¹, B. Pérez y J. Añez²

Modelística, Planificación y Sistemas

Apartado 47709

Caracas 1041-A, Venezuela

Tel: (+582) 761 5432, Fax: 761 7354

RESUMEN

En este documento se describen algunos de los avances teóricos, operativos y empíricos de la experiencia reciente de los autores en la planificación de transporte, con el objeto de someterlos a una discusión crítica más amplia, sin pretender dar respuesta a todos los problemas metodológicos. Las descripciones son breves y cubren sólo los aspectos que se han sometido a prueba; se excluyen muchos aspectos que actualmente están en investigación y desarrollo. Todo lo que se describe ha sido implantado operativamente en el sistema TRANUS (modelos de simulación integral del uso del suelo y transporte) y ha sido utilizado en la práctica en numerosos estudios.

Se comienza por presentar una descripción de lo que se denomina el esquema integrado en la modelación de transporte y usos del suelo, para entrar luego a los aspectos específicos de transporte. El primero de éstos se refiere a una revisión crítica del modelo logit, que subyace en la mayoría de los modelos. Sin abandonar los principios básicos de los modelos logit de decisión discretos, se reconocen los problemas en su formulación predominante, por demás conocidos hace tiempo, y se proponen posibles soluciones. Luego se abordan temas específicos de la modelación del transporte, comenzando por la técnica de redes duales, y las ventajas que representa para el análisis del transporte multimodal. Sigue una descripción del método de búsqueda de pasos múltiples; se introduce el concepto de "control de traslapes" como forma de corregir los errores de estimación de los modelos logit ante la correlación de atributos entre opciones. Esto conduce al tema de la asignación probabilística multimodal, mediante la cual, buena parte de la separación modal jerarquizada se trata a nivel de redes como un problema topológico.

1 Profesor del Postgrado de Planificación de Transporte de la Universidad Central de Venezuela

2 Los autores expresan sus agradecimientos a Francisco Martínez por sus valiosos comentarios a este artículo



1. INTRODUCCION

En lo que va de esta década la planificación de los sistemas de transporte ha pasado por una serie de cambios de gran significación. Algunos de ellos ya se venían manejando hace mucho tiempo, mientras otros obedecen a nuevas estrategias o a emergentes cambios que se están produciendo en el ámbito real de los sistemas de transporte. También se han producido muchos avances en las tecnologías de informática y comunicaciones que están teniendo una gran influencia, y la tendrán aún más en el futuro, sobre la forma como se planifican, diseñan y operan los sistemas de transporte. Entre los múltiples aspectos que cubren estos cambios, podrían señalarse dos de particular significación:

- * ante el crecimiento sostenido de la demanda de transporte, la solución de incrementar la oferta aparece como una estrategia agotada; mientras más autopistas se construyen, parece aumentar más la congestión;
- * el transporte aparece como el responsable más conspicuo del deterioro de la calidad ambiental, a través del consumo de recursos no renovables y la emisión de gases.

Estos dos problemas apuntan en una misma dirección: la necesidad de buscar nuevas soluciones y de explorar un rango más amplio de políticas que el que se venía manejando, sobrepasando incluso el ámbito del transporte propiamente tal. Algunos de estos problemas fueron señalados hace décadas, comenzando por el histórico Informe Buchanan de los sesenta, pero sólo recientemente un número creciente de investigadores, profesionales, políticos y la comunidad en general ha tomado consciencia acerca de su importancia. Un hecho significativo es la introducción de nueva legislación en USA que establece requerimientos específicos para que pueda otorgarse financiamiento federal a proyectos de inversión en transporte. El denominado ISTEA establece que toda propuesta debe ser el resultado de un análisis amplio de opciones multimodales, exige que se analicen los efectos sobre el uso del suelo y se diseñen políticas acordes de control de los mismos, que se analicen los efectos de la propuesta a una escala regional y a largo plazo, y que se estudien en detalle los efectos ambientales y energéticos, estableciendo, además, cláusulas penales a los infractores. La Comunidad Europea ha estado imponiendo criterios con orientaciones similares.

Para los planificadores de transporte, estos son requerimientos sin precedentes, y existe un consenso acerca de lo inadecuadas que resultan las metodologías actualmente en uso, en particular los modelos de transporte. Estos aparecen como herramientas un tanto anacrónicas, con pocas capacidades más allá de asignar automóviles a una extensa red de carreteras y autopistas, con una representación limitada del transporte público y carga, poca habilidad para simular ámbitos regionales, no consideración de los efectos sobre los usos del suelo y la localización de actividades, y fuertes restricciones para realizar evaluaciones económicas, energéticas y ambientales.

Otro elemento que ejerce presión sobre los actuales métodos, es la creciente complejidad que están adquiriendo los modernos sistemas de transporte. A nivel urbano resulta cada día más común encontrar complejas combinaciones entre el automóvil y una oferta diversificada de transporte público. En los países desarrollados, en los que predomina el uso del automóvil, se están implantando pistas para autos con alta ocupación (HOV), "park-and-ride", tarificación vial (road pricing), y las



autopistas inteligentes. En las ciudades latinoamericanas se presenta una diversidad considerable en el transporte público; se combinan sistemas informales con autobuses, minibuses, metro y sistemas de alimentación con tarifas integradas, además de los modos no-motorizados. A nivel regional, además de las tradicionales combinaciones entre carretera y ferrocarril, se han diversificado los servicios de pasajeros y son cada vez más complejas las formas de transportar carga, con contenedores, barcos ro-ro, terminales especializados, etc.

Por último, existen presiones sobre las metodologías provenientes del ámbito económico. Hasta hace poco bastaba con demostrar que un esquema propuesto era capaz de cubrir la demanda prevista, suponiendo que los recursos necesarios provienen de fondos públicos. Hoy en día todo proyecto de transporte requiere un análisis mucho más exhaustivo de las fuentes y destinos de los fondos, la rentabilidad económica y financiera de las inversiones y la distribución entre recursos públicos y los provenientes de inversionistas privados y los propios usuarios. Un mismo proyecto puede plantearse bajo distintos esquemas económicos y financieros.

Muchos de estos nuevos requerimientos son especialmente válidos en los países del tercer mundo, pues los sistemas de transporte público, además de muy importantes, suelen ser complejos. La endémica carencia de recursos del Estado obliga al análisis económico y financiero detallado de las propuestas. Tanto para productores como no-productores de petróleo, el recurso energético es vital. Por último, en nuestros países las ciudades y regiones crecen y cambian aceleradamente, y por lo tanto es poco realista ignorar los efectos de las políticas de transporte sobre la localización de actividades y el uso del suelo y su retroalimentación.

2. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA INTEGRADO

Se entiende aquí por sistema integrado un conjunto de modelos que permite simular las múltiples interrelaciones entre la localización de actividades y el transporte, complementado con un procedimiento de evaluación económica, financiera, energética y ambiental. Desde el siglo pasado los académicos vienen proponiendo esquemas teóricos en los cuales los aspectos de localización, usos del suelo y transporte conforman un sistema interdependiente. En los años 60 parecía que estas propuestas teóricas iban a ser llevadas a la práctica, con los importantes trabajos de Hansen (1959) y Lowry (1964), entre otros. Sin duda el trabajo culminante se debe a Wilson (1970), que basándose en principios de maximización de la entropía, postula un esquema teórico único mediante el cual la totalidad del fenómeno, desde localización de actividades hasta el transporte podían explicarse. En el esquema de Wilson faltaban elementos, principalmente una teoría económico-espacial con formación de precios y una explicación económica detrás de la concepción estadística de la entropía. La relación entre la lógica económica y los principios estadísticos fue resuelta por Domencich y McFadden (1975) al sintetizar la teoría de utilidad aleatoria o modelo general de decisiones discretas.

Los académicos y planificadores de transporte, sin embargo, adoptaron la propuesta de McFadden de manera muy limitada, no como una teoría general, sino sólo como modelo de separación modal. Las propuestas mucho más generales de Wilson, tendientes a explicar la totalidad del fenómeno urbano y regional del cual el transporte es sólo uno de sus elementos, fueron, en general, ignoradas. Sin embargo, a finales de la década del 70 todos los elementos para generar la síntesis estaban dados



para quien quisiera aprovechar la oportunidad. Esto fue lo que permitió a los autores de este artículo (De la Barra, 1989) combinar la idea de Wilson de utilizar una misma concepción teórica para explicar la totalidad de los fenómenos económico-espaciales, con el modelo anidado de decisiones discretas (NMLM) de McFadden. Para completar el esquema, se incorporó el modelo de insumo-producto de Leontief (1941), el cual fue generalizado y espacializado con una formulación probabilística, agregándole elementos microeconómicos básicos como la formación de precios, precios de equilibrio, elasticidades y sustituciones.

Como es bien conocido, el modelo NMLM provee una forma general de representar cadenas de decisión jerarquizadas. Provee no sólo un modelo probabilístico para distribuir demanda a opciones, sino que su formulación permite relacionar unas distribuciones con otras a través del concepto de costos (o utilidades) compuestos. Los costos compuestos permiten establecer, además, una relación directa y teóricamente consistente con el concepto de excedente a los consumidores, con lo cual se resuelve la parte más difícil de la evaluación.

El esquema integral desarrollado por los autores utiliza extensamente estas posibilidades, al representar un sistema económico-espacial mediante una secuencia de modelos de decisión discretos encadenados jerárquicamente. En cada eslabón de la cadena se calcula probabilísticamente la distribución de la demanda a opciones de oferta y se deriva la utilidad compuesta que incidirá sobre la decisión que lo precede. Una cadena típica podría ser la siguiente:

lugar de trabajo → residencia → compras → modo de transporte → ruta

Cada eslabón en una cadena está influenciado por el que lo precede. Por ejemplo, la escogencia del lugar de compras está condicionada por la decisión previa sobre el lugar de residencia. Cada eslabón de la cadena se representa con un modelo de decisión, lo cual resulta en probabilidades tales como $P(\text{res})$, $P(\text{com})$, $P(\text{modo})$ y $P(\text{ruta})$, de tal manera que el número de personas que viajan en una ruta de autobús desde un origen a un destino, con motivo compras, se puede estimar por el número de personas que trabajan en una zona, multiplicado por la probabilidad de que vivan en la zona de origen, por la probabilidad de que escojan la zona de destino para ir de compras, por la probabilidad de que escojan el modo público y, finalmente, por la probabilidad de que escojan una ruta. Por otra parte, cada eslabón está influenciado por el que le sigue. En el ejemplo, puede ocurrir que las personas elijan un determinado lugar de compras porque está comunicado con un buen servicio de autobuses. En otras palabras, la escogencia del lugar de compras está condicionada por la disponibilidad de modos de transporte, y de manera similar, el lugar de residencia puede estar influenciado por la accesibilidad a lugares de compra. Esta relación *hacia atrás* se establece a través de las utilidades compuestas. Así, al introducir en el modelo una nueva ruta, la utilidad mejorada se transmite a la escogencia de modos, de lugar de compras y de lugar de residencia.

El proceso terminaría de no ser por la presencia de *utilidades variables* y *elasticidades*. En el ejemplo anterior, si el número de personas que escoge el autobús sobrepasa la capacidad del mismo, el costo (o tiempo) de viaje por dicho modo aumentará; con ello, el modo autobús será menos atractivo y en una segunda secuencia de cálculo, la probabilidad de que sea seleccionado disminuirá. En otras palabras, la utilidad asociada con el autobús varía. Este efecto se traslada a la escogencia de lugar de compras, ya que la zona será menos atractiva, y eventualmente afecta también la escogencia

de lugar de residencia. Por otra parte, los usuarios pueden realizar menos viajes (elasticidad). El proceso se hace entonces iterativo: se calculan los costos compuestos hacia atrás y las probabilidades hacia adelante, ajustando los costos hasta que el sistema converge a un equilibrio.

Este esquema ha sido generalizado a tal punto que el modelo resultante puede aplicarse a cualquier sistema económico-espacial. A nivel urbano, generalmente se definen las actividades desagregadas por tipo de empleo o grupos socioeconómicos de población, edificaciones, diversas tipologías de suelo con sus respectivas reglamentaciones de uso y constructibilidad y, en general, cualquier categoría relevante para el caso de estudio. El sistema de transporte, por su parte, hará énfasis en pasajeros, con una descripción detallada del transporte público. A nivel regional, en cambio, suelen representarse los sectores productivos por rama de actividad, ex/importaciones, con énfasis en las relaciones económicas para la formación de precios; en el transporte se representan los movimientos de carga y pasajeros, especificando carreteras, puertos, ferrocarriles y puntos de transferencia de mercancías.

Entre las ventajas que ha demostrado este esquema integrado actividades-transporte en la práctica, se pueden destacar las siguientes:

- a) permite estimar los efectos de las políticas de transporte sobre la localización de actividades y el mercado inmobiliario;
- b) permite corregir las estimaciones de demanda de transporte debido a cambios en las políticas de control o limitaciones en la oferta de suelo y superficie construida;
- c) hace posible el diseño y evaluación de políticas de transporte y usos del suelo combinadas y consistentes;
- d) a nivel regional permite estimar la demanda de carga como resultado de las relaciones de producción y consumo de las actividades;
- e) complementa la evaluación al incluir los beneficios de usos del suelo además de los de transporte;
- f) hace posible la evaluación ambiental de las políticas;
- g) permite realizar estimaciones de demanda de transporte en condiciones de escasa información, aprovechando los datos sobre actividades y suelo, generalmente disponibles.

3. REVISION DEL MODELO DE DECISIONES LOGIT

De la descripción anterior se deduce que el modelo logit anidado constituye el elemento central del esquema integrado, y por lo tanto, buena parte de su desempeño dependerá de sus propiedades. El modelo logit está ampliamente documentado, y su popularidad proviene de su base teórica, del realismo razonable de los resultados que produce y de la facilidad con que se puede estimar. Pero en modelación del transporte rara vez ha sido utilizado más allá de la esfera de la separación modal jerarquizada. El esquema integral somete al logit a exigencias mucho mayores por dos razones:

- hace uso extensivo de la utilidad compuesta para encadenar unas decisiones con otras y para estimar los excedentes a los consumidores, mucho más allá de los dos o tres niveles que se manejan en la separación modal;



- obliga a trabajar con un rango de escalas mucho mayor al evaluar de manera simultánea una gran variedad de decisiones.

Por contraste con las características positivas que lo han favorecido, el logit posee varios atributos adversos que también han sido ampliamente cubiertos en la literatura, entre otros: no reconoce la correlación de atributos entre las opciones, no reconoce la escala de las decisiones y la propiedad del costo compuesto de converger a menos infinito. Las razones por las cuales académicos y profesionales han vivido por 20 años con estos problemas es materia de debate, pero buena parte de la explicación reside en el uso limitado que se ha dado al modelo básico. Al utilizarlo en el esquema integrado, en cambio, estas propiedades se hacen demasiado evidentes como para ser ignoradas. En las secciones a continuación se presenta primero la formulación del modelo logit anidado estándar; luego se trata el problema de escala, para continuar con el de la negatividad, dejando la correlación de atributos para secciones siguientes.

3.1 ESCALAS DE UTILIDAD

La derivación del modelo multinomial logit anidado (NMLM) se encuentra bien documentada en la literatura, como por ejemplo, en Domencic y McFadden (1975). Si el término V_{in} representa una función de costos percibidos o desutilidad asociada a una opción i para un grupo de decisión n , la probabilidad $P_n(i)$ que escojan dicha opción entre un conjunto C_n adopta la forma:

$$P_n(i) = \frac{\exp(-\mu V_{in})}{\sum_j \exp(-\mu V_{jn})} \quad \forall i, j \in C_n, \quad (1)$$

y el indicador de utilidad compuesta es:

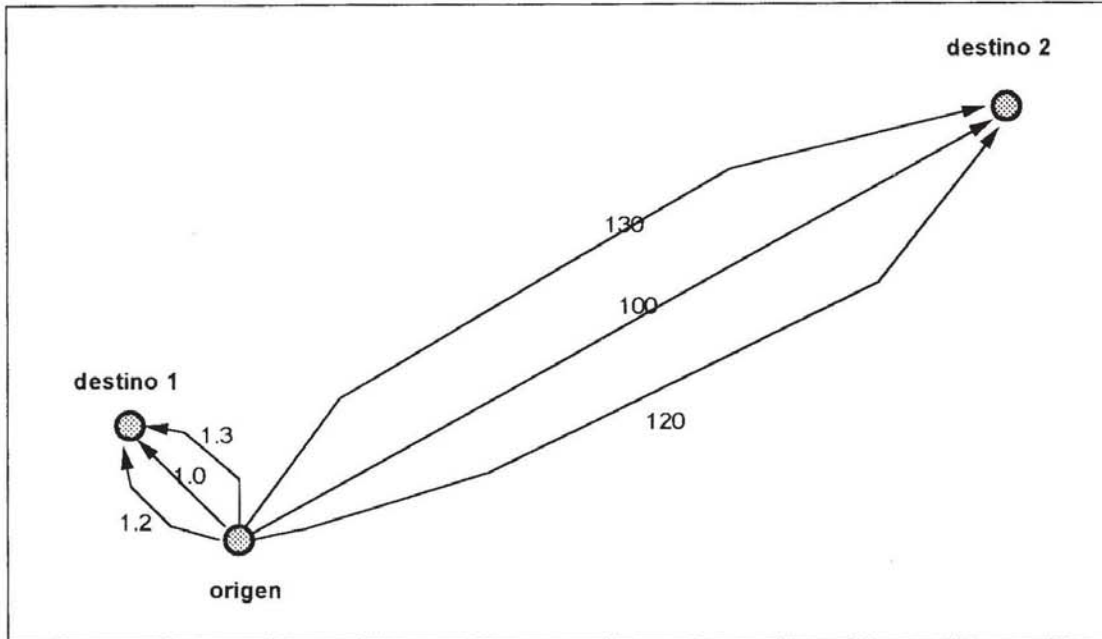
$$U_n = -\frac{1}{\mu} \ln \sum_j \exp(-\mu V_{jn}), \quad \forall j \in C_n. \quad (2)$$

Un supuesto importante en la derivación de este modelo se refiere a la forma que adopta la función de distribución del error en la percepción de la desutilidad. En el caso del logit, se supone que el error asociado a cada opción $j \in C_n$ adopta la forma de distribuciones idénticas e independientes Gumbel. Ben-Akiva y Lerman (1985) señalan que esto equivale a un supuesto de homocedasticidad o igual varianza. En términos prácticos, esto equivale a que, para cada conjunto de opciones, sólo es necesario estimar un único parámetro μ , como sería el caso de diversas opciones de viaje entre un origen y un destino determinados.

En muchas aplicaciones, especialmente de modelos integrales como los reseñado al comienzo, el modelo debe ser aplicado para representar situaciones a diversas escalas, como sería el caso de

múltiples orígenes y destinos, algunos próximos y otros alejados entre sí. En estas circunstancias resulta difícil mantener el criterio de homocedasticidad para los diversos conjuntos de opciones. Considérese el ejemplo de la Figura 1, en la cual se presenta un origen y dos destinos, siendo los costos de las opciones de viajar al destino 2 diez veces mayores que los de viajar al destino 1.

Figura 1: Decisiones a escalas diferentes



Intuitivamente se esperaría que los usuarios percibirían ambas situaciones como similares. Sin embargo, si se aplica la ecuación (1) para las probabilidades y (2) para la desutilidad compuesta y suponiendo un valor de $\mu=0.2$ para ambos casos, los resultados son los siguientes:

Costo generalizado	Probabilidad
1.0	0.3445
1.2	0.3310
1.3	0.3245
utilidad compuesta	-4.328

costo generalizado	probabilidad
100	0.9796
120	0.0179
130	0.0025
utilidad compuesta	99.897

Estos resultados son claramente irrealistas, y sirven para mostrar lo difícil que puede resultar obtener un valor único para μ , *cualquiera sea el método de calibración empleado*. Si se incrementa el valor de μ se mejoran los resultados del primer caso, pero las probabilidades del segundo caso rápidamente devienen 1.0, 0.0 y 0.0.

La adopción de un valor único para μ implica que la desviación estándar del error es idéntica en ambos casos. Una posible solución a este problema sería adoptar valores diferentes de μ en cada caso, estimándolos por separado. Sin embargo, esto sería una solución muy poco práctica, ya que si en el sistema hay n zonas, sería necesario realizar $n \times n$ estimaciones, típicamente varios miles.

La alternativa que se propone aquí es el transformar sistemáticamente la función de costos o desutilidades percibidas, tal que resulte razonable la utilización de un único parámetro en todos los casos. Esto puede lograrse si es que se introduce el supuesto que la percepción de la desutilidad decrece marginalmente a medida que el costo de las opciones se hace mayor. Esto puede interpretarse como una propiedad inherente de la psicología de los consumidores, o como una pérdida gradual del grado de precisión con que los consumidores perciben los costos.

Existen varias formas posibles para representar la *percepción marginal decreciente de la utilidad*; la más sencilla es suponer que disminuye linealmente. Esto se logra dividiendo el término de desutilidad en la ecuación (1) por la desutilidad de la mejor opción, es decir, *escalando* las desutilidades:

$$P_n(i) = \frac{\exp(-\mu(V_{in} / \min_j(V_{jn})))}{\sum_j \exp(-\mu(V_{jn} / \min_j(V_{jn})))} \quad \forall i, j \in C_n \quad (3)$$

La desutilidad compuesta se transforma en:

$$U_n = -\frac{1}{\mu} \ln \left[\sum_j \exp(-\mu(V_{jn} / \min_j(V_{jn}))) \right] \cdot \min_j(V_{jn}), \quad \forall j \in C_n \quad (4)$$

Al multiplicar la desutilidad compuesta por el mínimo, se anula el efecto escala, sin perder la propiedad de percepción marginal decreciente. Esta transformación final es importante ya que la desutilidad compuesta puede ser transferida a niveles más altos en la jerarquía de decisiones, y pueden competir opciones con *escalas de utilidad* diferente.

Es fácil comprobar que el modelo (3) produce las mismas probabilidades para los dos casos del ejemplo anterior, en rigor iguales al primer caso. Estos resultados se describen más adelante. El ejemplo también demuestra la importancia de *desescalar*, ya que de lo contrario ambas situaciones darían como resultado la misma desutilidad compuesta.

3.2 DESUTILIDAD COMPUESTA

Las funciones de utilidad escaladas producen resultados más realistas y facilitan la estimación del modelo. Sin embargo, no resuelven el problema de la negatividad de la desutilidad compuesta. En el ejemplo anterior puede verse que la forma tradicional (2) produce un resultado negativo en el primer caso; sin embargo, si se utiliza la forma (4), el resultado sería negativo en ambos casos: -4,328 y -432,8.

Las condiciones que debe cumplir el indicador de desutilidad compuesta son los siguientes:

$$U_n < \min_j (V_{jn}), \quad (5)$$

$$\lim_{\mu \rightarrow \infty} (U_n) = \min_j (V_{jn}), \quad (6)$$

$$\lim_{\mu \rightarrow 0} (U_n) = 0. \quad (7)$$

La formulación de la utilidad compuesta (2) cumple con las condiciones (5) y (6), pero no con la condición de no-negatividad (7), ya que cuando $\mu \rightarrow 0$, $U_n \rightarrow -\infty$. Esta última condición es importante para mantener consistencia con la teoría del consumidor, ya que en una función de demanda tanto las cantidades consumidas como los precios sólo existen en el cuadrante positivo. En general este requisito ha sido ignorado por la literatura, pero ha sido señalado como un *absurdo económico* por algunos autores, como Fosk y Boyce (1984).

Sin describir los detalles de su derivación, la solución propuesta toma como punto de partida las probabilidades de selección de las opciones. Por conveniencia se define primeramente el término:

$$G_{in} = \exp(-\mu(V_{in} / \min_j (V_{jn}))), \quad (8)$$

Luego se define una serie de la siguiente forma:

$$G_n^* = G_{1n} + (1 - G_{1n})G_{2n} + (1 - G_{1n})(1 - G_{2n})G_{3n} + \dots \quad (9)$$

Finalmente se calcula la desutilidad compuesta como:

$$U_n = -\frac{\ln G_n^*}{\mu} \min_j (V_{jn}) \quad (10)$$

Es posible demostrar que esta formulación es consistente con el modelo probabilístico y que cumple con las tres condiciones establecidas. Utilizando la formulación propuesta y el mismo valor de $\mu=0.2$ se obtienen los siguientes resultados para el ejemplo anterior:

costo generalizado	probabilidad
1.0	0.3445
1.2	0.3310
1.3	0.3245
utilidad compuesta	0.0445

costo generalizado	probabilidad
100	0.3445
120	0.3310
130	0.3245
utilidad compuesta	4.4447



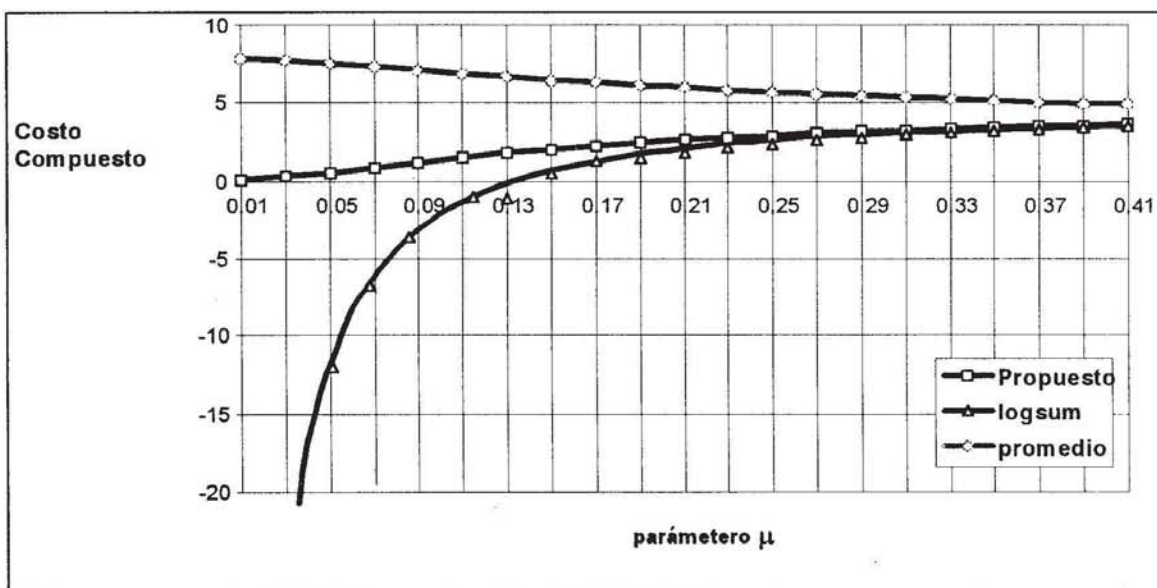
Resultados más realistas se obtienen con una valor más alto de $\mu=2.0$:

costo generalizado	probabilidad
1.0	0.4506
1.2	0.3021
1.3	0.2473
utilidad compuesta	0.6506

costo generalizado	probabilidad
100	0.4506
120	0.3021
130	0.2473
utilidad compuesta	65.0661

En la Figura 2 se trazan tres funciones alternativas de costo o desutilidad compuesta, para diferentes valores de μ : promedio simple, el *log-sum* de la ecuación de la ecuación (2), y el indicador propuesto de la ecuación (10). Este ejemplo supone una situación con tres opciones de costos = 4, 8 y 12. Puede verse que la *log-sum* original decae desde el costo de la opción de menor costo hasta $-\infty$. El promedio simple varía desde el costo de la opción de menor costo hasta un valor intermedio entre las opciones. Finalmente, la solución propuesta varía desde el costo de la opción de menor costo hasta cero, con lo cual satisface las condiciones requeridas. Para que las trazas resulten comparables, las funciones no fueron escaladas.

Figura 2: Funciones alternativas de utilidad compuesta



4. REDES DUALES MULTIDIMENSIONALES

Una forma conveniente e intuitiva de representar redes de transporte ha sido como un grafo direccionado en que los nodos representan intersecciones y los arcos representan tramos de carreteras, vías férreas o cualquier otro elemento de la oferta física. Un subconjunto de los nodos se denominan centroides, que son puntos representativos de las zonas en que se ha dividido el área de estudio. Todos los viajes se suponen con origen y destino en centroides. Sobre esta representación es que se realizan los diversos procedimientos de cálculo, como búsqueda de pasos y asignación. Sin embargo, un problema que presenta esta forma de grafo es la dificultad de representar giros prohibidos. El método comúnmente utilizado es el de expandir los nodos de la red en cada intersección afectada, y codificar, a través de enlaces ficticios, los movimientos permitidos. Algunos modelos de transporte que se utilizan en la actualidad han automatizado este procedimiento, pero el efecto de un giro prohibido afecta no sólo a las intersecciones en que se aplica, sino a muchas otras relacionadas. Por tanto, se debe aceptar el alto costo de expandir todos los nodos de la red o aceptar una representación aproximada. Una forma más eficiente, y adoptada por muchos modelos, denominada *forward star*, fue propuesta por Dial et al. (1979); consiste en construir un sistema de apuntadores que señalan los nodos hacia los cuales es factible realizar un giro.

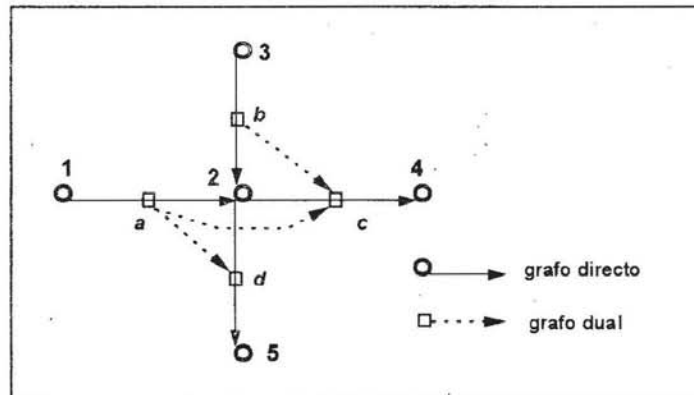
Desde hace varios años los autores desarrollaron una forma alternativa, documentada de manera detallada en Añez et al. (1995), que además de evitar la aproximación, permite representar giros prohibidos en redes multimodales de forma simple, mediante la generación de un grafo dual.

Para su aplicación, se codifica la red de la forma tradicional, mediante nodos y enlaces, como se indica en la Figura 3. Luego el modelo genera los enlaces duales mediante la aplicación de un conjunto de reglas simples:

- a) cada enlace de la red directa pasa a ser un nodo en la red dual, reteniendo todas las características del enlace original, incluyendo los números de origen y destino;
- b) los enlaces del grafo dual representa giros factibles;
- c) los centroides son nodos tanto en el grafo directo como en el dual.



Figura 3: Grafo directo y grafo dual



Para representar los giros prohibidos sólo se requiere especificar en la red directa los nodos hacia los cuales no se permite girar desde un enlace determinado. Así, por ejemplo, si desde el enlace 1-2 no se permite girar hacia 5, el sistema se abstendrá de generar el enlace dual *a-d*. Este procedimiento es completamente transparente para el analista y, debido a que los nodos duales retienen la identificación origen-destino de la red directa, luego de realizar los cálculos es muy simple presentar los resultados en la representación original.

La extensión multimodal del método descrito consiste en agregar múltiples dimensiones a cada enlace de la red directa en función de los diversos tipos de vehículos y rutas de transporte público que pueden utilizar cada enlace. Esto genera un conjunto de combinaciones enlaces/rutas. Luego, al formar el grafo dual se generan tantos enlaces duales como combinaciones factibles entre los enlaces/rutas. Algunos enlaces duales representan la continuación de un viaje en una misma ruta, mientras otros representan trasbordos. Al igual que con los giros prohibidos, el usuario del modelo puede especificar partes de la red en la cual una ruta no puede combinarse con las demás, es decir, en donde la ruta no tiene paradas. De esta manera, una codificación relativamente sencilla permite la representación de una compleja red multimodal, ya sea para representar redes de transporte público con múltiples rutas, o sistemas de transporte de carga en el cual participan diversos tipos de camiones, ferrocarriles, barcos y estaciones de trasbordo.

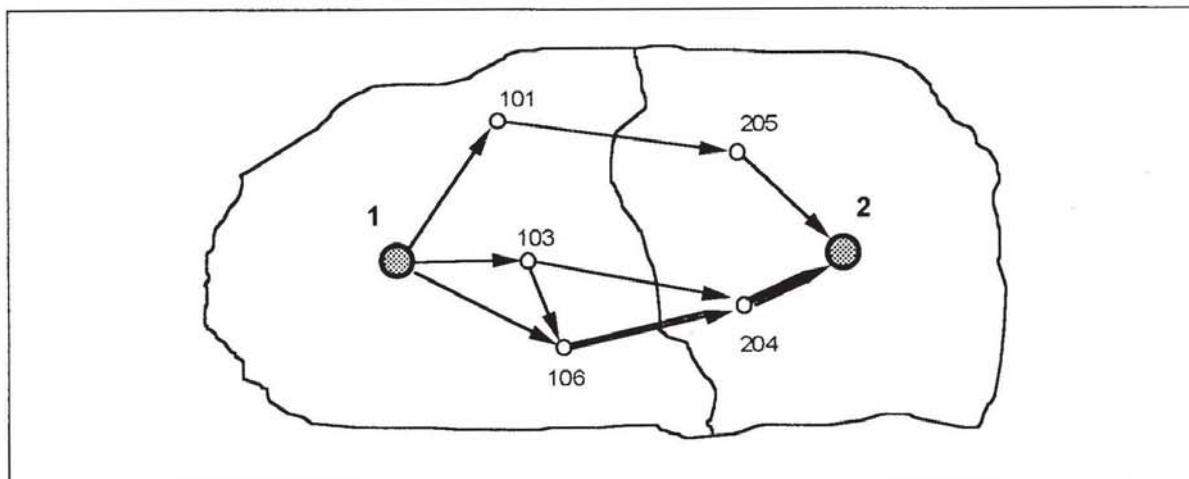
En general la descripción ha presentado los enlaces duales como un mecanismo booleano que permite o prohíbe conexiones. Sin embargo, los enlaces duales mismos pueden tener propiedades variables que enriquecen la representación del sistema, especialmente capacidad limitada en los giros. En la actualidad se ha desarrollado la restricción de capacidad en los trasbordos para estimar los tiempos de espera, y el mismo mecanismo podría aplicarse en un modelo detallado de tráfico para estimar retardos variables en intersecciones.

5. PASOS MÚLTIPLES Y ASIGNACIÓN MULTIMODAL

Las redes duales multimodales constituyen la base para construir un modelo de pasos múltiples. El objetivo es estimar las principales opciones de viaje entre un origen y un destino para una determinada categoría de demanda, ya sea carga o pasajeros. Una vez identificadas las opciones la demanda

se distribuye a los pasos resultantes mediante un modelo logit. El método desarrollado por los autores tiene el objetivo adicional de obtener pasos diferenciados, es decir, de minimizar la correlación de atributos entre las opciones. En el modelo, la correlación de atributos se representa en términos del grado de coincidencia o *traslape* entre dos pasos, como se muestra en la Figura 4. Entre las zonas 1 y 2 se pueden dar cuatro pasos con diversos grados de traslape entre sí; por ejemplo, el paso 1-101-205-2 no se traslapa con ningún otro, mientras el arco 204-2 es común a tres pasos.

Figura 4: Correlación de atributos entre pasos



Para determinar el conjunto de pasos, el algoritmo procede de la siguiente forma:

- a) buscar el paso de menor costo traslapado;
- b) verificar que el paso no haya sido encontrado antes y guardar; de lo contrario, suspender la búsqueda;
- b) penalizar por un factor dado (denominado Oz) todos los enlaces-rutas que forman parte del último paso y regresar al punto a).

Un elemento clave en este algoritmo es el factor de penalización Oz que se utiliza para determinar el costo traslapado de un paso. Este factor se aplica al costo generalizado de todos los enlaces-rutas que conforman un paso, y deberá ser ≥ 1 . Cuando se comienza, se encontrará el paso de menor costo generalizado, que por ser el primero, no estará traslapado. Si el factor de penalización $Oz > 1$, es probable que en una segunda búsqueda aparezca otro paso, y mientras mayor sea el valor de Oz , menor es la probabilidad de que enlaces-ruta que formaban parte del primer paso estén en el paso siguiente, y así sucesivamente hasta que vuelve a aparecer un paso igual a uno previamente guardado, caso en el cual se suspende la búsqueda. Si $Oz = 1$, el primer paso de menor costo generalizado no será penalizado, de tal manera que aparecerá inmediatamente de segundo paso y causará la suspensión de la búsqueda, generándose un sólo paso.

Como puede verse, el factor Oz cumple varias funciones. A medida que aumenta el valor de Oz : i) se generan más pasos; ii) los pasos son más diferenciados; y iii) ningún paso resultante puede tener un costo generalizado mayor que el del primer paso multiplicado por Oz , de tal manera que actúa como un factor de máxima dispersión. Los pasos resultantes serán una secuencia de enlaces-rutas de forma



$l_1r_1, l_2r_1, l_3r_2, \dots$ que permiten viajar desde el origen al destino a través de cualquier combinación factible. Nótese que dos pasos que comparten la misma secuencia de enlaces físicos se consideran distintos si las rutas u operadores son diferentes.

Una vez determinada la secuencia de los diferentes pasos, la distribución de la demanda se realiza a través de un multinomial logit escalado como el descrito anteriormente, pero con el costo generalizado de cada paso penalizado por el traslape o grado de coincidencia entre los pasos. El factor de penalización en la asignación no es el mismo que el utilizado en la búsqueda de pasos, sino que se calcula como el número de veces que se genera una coincidencia. Así, en el ejemplo de la Figura 4, el costo generalizado del enlace 106-204 será multiplicado por 2, el del enlace 204-2 será multiplicado por 3, mientras el de los demás enlaces permanecerá inalterado.

Resulta muy simple demostrar que este procedimiento compensa totalmente el problema de correlación de atributos entre las opciones inherente al logit. Tradicionalmente la forma de corregir este problema ha sido mediante la construcción de un logit jerarquizado, en la cual el modelista define *a priori* un árbol de decisiones. En este caso se aplica el mismo criterio, pero es el propio modelo el que construye el árbol, ordenando las diversas ramas de acuerdo a la correlación topológica que va encontrando. Naturalmente la complejidad del árbol que construye el modelo supera ampliamente las limitadas posibilidades de construirlo *a priori*, y, lo que es más importante, evita la extraordinaria complejidad de calibrar un modelo con múltiples parámetros. En el esquema propuesto sólo hay un parámetro a estimar, el cual se multiplica varias veces de acuerdo a la correlación topológica entre las opciones. Nótese que el árbol que se genera es diferente para cada par origen-destino. También es importante destacar que, por el hecho de trabajar sobre una red multimodal, el método propuesto realiza simultáneamente los procesos de separación modal y asignación.

Finalmente, deben señalarse las ventajas del método para la evaluación. Los costos traslapados se utilizan para el cálculo de la utilidad compuesta; de esta manera, si el proyecto a evaluar representa una pequeña variante respecto a las opciones existentes, el excedente al consumidor será mucho menor que si se trata de una nueva opción claramente diferenciada. Adicionalmente, el hecho que el modelo trabaja con una descripción detallada de cada opción permite llevar una contabilidad exacta de los costos monetarios y percibidos por los usuarios y de los costos de operación, lo cual no es posible en métodos en los cuales sólo se hace explícito el paso mínimo.

REFERENCIAS

- AÑEZ, J., DE LA BARRA, T. Y PÉREZ, B. (1995) Dual Graph Representation of Transport Networks. **Transportation Research** (aceptado para publicación).
- BEN-AKIVA, M., y LERMAN, S. R. (1985) **Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand**. Cambridge MA: The MIT Press.
- DE LA BARRA, T. (1989) **Integrated Land Use and Transport Modelling**. Cambridge, UK: Cambridge University Press.



DE LA BARRA, T., PÉREZ, B. y AÑEZ, J. (1993) Multidimensional path search and assignment. **Proceedings of the 21st PTRC Summer Annual Meeting**. London: PTRC.

DIAL, R., GLOVER, F., KARNEY, D. AND KLINGMAN, D. (1979). A computational analysis of alternative algorithms and labeling techniques for finding shortest path trees. **Networks** 9, 215-248.

DOMENCICH, T. y MCFADDEN, D. (1975) **Urban Travel Demand: a Behavioral Analysis**. Amsterdam: North-Holland.

FISK, C. S. y BOYCE, D. E. (1984) A modified composite cost measure for probabilistic choice modeling. **Environment and Planning A**, 16, 241-248.

HANSEN, W. G. (1959) How accessibility shapes land use. **Journal of the American Institute of Planners**, 25.

LEONTIEF, W. W. (1941) **The Structure of the American Economy 1919-1939**. 2nd ed. 1951. New York: Oxford University Press

LOWRY, I. S. (1964) **A Model of Metropolis**. Santa Monica, CA: Rand Corporation.

WILSON, A. G. (1970) **Entropy in Urban and Regional Modelling**. London: Pion.

