

CAPITULO II. LA ESTIMACION DE LA GENERACION DE VIAJES DENTRO DEL PROCESO DE PLANIFICACION DEL TRANSPORTE

Gran parte de los problemas urbanos en las ciudades venezolanas están relacionadas con los procesos de intercambio que genera la interacción de la población. Estos intercambios conllevan el desplazamiento de personas y bienes en una trama vial comúnmente escasa, poco flexible y siempre retrasada en su desarrollo en relación a las demandas de los usuarios. Más aún, si estas demandas tienen peculiares características como la concentración horaria, la regularidad de algunos viajes y lo aleatorio de otros, es necesario construir metodologías de análisis que permitan adelantarse a los problemas provocados por estos desplazamientos, o al menos comprender claramente sus causas y diseñar soluciones.

La planificación del transporte es la respuesta a esta necesidad. La estructura clásica del proceso desarrollada en los años 60 no ha sido modificada sustancialmente. En este capítulo se expone un resumen de los métodos de estimación de la Generación de Viajes -primer paso- dentro del proceso de planificación del transporte, incluyendo un breve listado de términos importante a efectos de la investigación. Para los distintos modelos que se utilizan en generación de viajes se presentan sus características más importantes desde el punto de vista de su formulación matemática, la información requerida y los procedimientos para la evaluación de sus bondades. Para concluir se realiza un análisis comparativo de estos modelos de estimación.

Es importante señalar que la intención es tan sólo mostrar al lector un breve resumen de los principales modelos y su relación con la metodología de Tasas de Generación de Viajes, y no desarrollar una exhaustiva investigación sobre el estado del arte en esta materia.

II.1. GENERACION DE VIAJES, PRIMER PASO DEL PROCESO DE PLANIFICACION.

El principal objetivo del proceso de planificación del transporte es determinar el número de viajes que se realizarán en un área determinada, definiendo sus orígenes y destinos, los modos de transporte que se utilizarán y la ruta que seguirán para efectuarse. Como se adelantara, desde los años 60 se han desarrollado una serie de metodologías y modelos para dar cumplimiento a este objetivo, y poder así predecir con mayor exactitud el comportamiento de los viajes. El basamento teórico detrás de todas las técnicas de modelación desarrolladas hasta el presente es la posibilidad de describir las características de los viajes de un amplio número de personas a través de la abstracción del proceso de toma de decisiones de un individuo promedio.

El enfoque tradicional del proceso, que parte de una sectorización que recoja las particularidades de la zona en estudio, una red que represente las distintas instalaciones y medios de transporte a disposición de la población, y la correspondiente recopilación de información, desarrolla una metodología de análisis dividida en cuatro fases. En orden secuencial se estima la Generación de Viajes, la Distribución de Viajes, la Distribución Modal y la Asignación de Viajes. “Los tres (primeros) submodelos reseñados componen la parte de modelación de la demanda, y culminan con la predicción del número de viajes entre cada par de zonas por cada medio de transporte disponible, dados los costos de viaje interzonales...”¹ y la cuarta o última etapa considera los aspectos de la oferta de transporte, ya que define la ruta que utilizarán los viajes para llegar de cada origen a cada destino, en relación con la red vial o los sistemas de transporte disponibles; y más recientemente, incorpora también el proceso de equilibrio oferta-demanda indispensable para validar los resultados de cualquier evaluación.

Aunque cada fase se trata como un submodelo separado, los recientes avances en las técnicas de planificación se han centrado en el desarrollo de mecanismos que

¹ ORTÚZAR SALAS, Juan de Dios. “*Modelos de Demanda de Transporte*”. Ediciones Universidad Católica de Chile, Facultad de Ingeniería, Colección Textos Universitarios. Santiago, Chile, 1994. Pág. 95

permitan mejorar la vinculación sistémica de éstos, pues es innegable la estrecha dependencia que existe entre cuánto, desde y hacia donde, cómo y por donde se realizan los viajes.

El primer paso del proceso de planificación del transporte, en el cual se centra la investigación presentada, es la estimación de la Generación de Viajes que tiene como propósito definir el número total de desplazamientos producidos y atraídos por un sector, en un día típico, para un año de análisis futuro partiendo de las características actuales. Puede expresarse en viajes de personas o viajes de vehículos, dependiendo de los objetivos perseguidos por el estudio para el cual se realiza la estimación.

Estas predicciones tienen su base en dos premisas. Según la primera, los viajes guardan una estrecha relación con las características urbanas del sector y con las condiciones socioeconómicas de la población que realizará el viaje, permitiendo estimar la generación a partir de parámetros conocidos o de fácil determinación. Estos parámetros tienen implicaciones en cuanto a la magnitud, horario y modos de transporte utilizados para realizar los viajes. La segunda premisa, establece la permanencia en el tiempo de las relaciones entre los parámetros o variable independientes y el volumen de demanda generado, permitiendo validar, a efectos del desarrollo de los modelos, la posibilidad de establecer proyecciones.

Y es en esta última consideración donde radica la importancia de la fase de Generación de Viajes pues es necesario comprender los condicionantes actuales de la producción y atracción de viajes para poder luego establecer la demanda futura, que pasará en las siguientes fases del proceso de planificación a ser distribuida entre los distintos pares origen-destino, asignada a los modos disponibles de transporte y cargada en una red vial que finalmente puede evaluarse en términos de la calidad de funcionamiento de todo el sistema de transporte.

Sin embargo, la primera tarea del proceso de planificación no es sencilla, y en la actualidad presenta algunos problemas que las metodologías desarrolladas y los modelos disponibles no han podido resolver del todo. Estos problemas son de dos tipos. Los primeros, relativos a consideraciones de formulación teórica, surgen del

aislamiento en que se mantiene al submodelo de generación, basado en el concepto de la inelasticidad de la demanda de viajes ante cambios en la red vial o en los servicios de transporte, considerados la oferta del sistema. En la práctica, y con la profundización de la comprensión de los sistemas urbanos y sus cambios, se ha podido demostrar que en el largo plazo esta condición de estabilidad no se mantiene, ocasionando distorsiones en las estimaciones, pues la retroalimentación entre oferta y demanda no puede ser incorporada en ninguna de las fases del proceso de planificación.

En segundo término, los problemas de esta etapa están vinculados a los requerimientos de información y a los esfuerzos económicos necesarios para lograr construir y mantener actualizada la base de datos que permita utilizar los diferentes modelos disponibles. En países con escasez de recursos y poca tradición en la recopilación de información regular, actualmente se plantean serias dificultades para el desarrollo de estudios que puedan medir el impacto de políticas y proyectos de diversa índole, en el área del transporte y por consiguiente en la calidad de vida en zonas urbanas.

II.2. ALGUNAS DEFINICIONES NECESARIAS

Para avanzar en los aspectos más importantes de esta investigación es necesario precisar algunos conceptos básicos involucrados en ella. De esta manera su cuerpo teórico y el posterior desarrollo de la metodología propuesta será más claro. Muchas de estas definiciones han sido extraídas de las publicaciones del Instituto de Ingenieros de Transporte de Estados Unidos (Institute of Transportation Engineers, ITE) relativas a Generación de Viajes², así como de otra bibliografía consultada y del propio desarrollo y precisión metodológica de la investigación.

En particular, para dar consistencia al proceso de construcción de las tasas de generación locales a partir de esta investigación, se han adoptado algunos conceptos que, aunque no responden a la terminología comúnmente utilizada en el contexto venezolano, permitirán establecer una clara comparación con la

² INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS. "Trip Generation, User's Guide" 6th Edition, Volumen 3, Washington, D.C., 1997; y "Trip Generation Handbook", Washington, D.C., Octubre, 1998.

metodología ITE. También se han precisado algunos elementos que aunque en otros contextos pueden tener una definición más amplia, aquí se han focalizado a aspectos particulares dentro de la investigación. Por otra parte, algunas de las definiciones aquí presentadas se desarrollarán con mayor detalle y extensión en posteriores capítulos de acuerdo a la relevancia que representan para el análisis.

Estos conceptos y sus definiciones, presentados en orden alfabético, son los siguientes:

Accesibilidad: característica o cualidad que favorece a una zona, sector o parcela en virtud de su relación con el sistema vial y de transporte que opera en su entorno. Puede establecerse en términos de distancia, tiempo o costo.

Ambiente Urbano: "...concentración muy densa de personas, residencias, locales de trabajo, centros de comercio y servicios, locales de recreación y entretenimiento, así como una serie de facilidades y utilidades relacionadas con el mantenimiento de las necesidades humanas..."³

Area Bruta Alquilable (GLA o ABA): área de construcción total diseñada para la ocupación y uso exclusivo de los inquilinos, incluyendo las ubicadas en cualquier sótano, mezzanina o pisos superiores, y medida desde la línea central de las paredes divisorias hasta las fachadas externas. Es toda el área por la cual los inquilinos pagan renta; es el área que produce ingresos. En actividades comerciales esta área facilita las comparaciones estadísticas. Para efectos del cálculo de la generación de viajes, las áreas de estacionamiento internas no son incluidas.

Area Bruta de Construcción de una Edificación (GFA o ABC): área resultante de la sumatoria del área de cada nivel, incluyendo bodegas, sótanos, mezzaninas, penthouses, corredores, lobbies, tiendas y oficinas; que están dentro de las principales fachadas de la edificación, excluyendo elementos arquitectónicos o proyecciones. Están incluidas todas las áreas que tienen superficie con altura

³ DE ABREU, Vania C., Luis S. DA CRUZ SILVEIRA y Yaeko YAMASHITA. "Determinação do Fator de Atração de Viagens para Análise de Demanda de Transportes". En Actas del XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. ANPET. Sao Carlos, Brasil, 1999. Pág. 51

estándar (2,60 m.) independientemente de su uso. Si un área a nivel de la parcela dentro de la fachada no está cerrada, es considerada parte del área total de la edificación. Sin embargo, áreas no techadas y espacios techados pero no cerrados, excepto los incluidos dentro de las fachadas, deben ser excluidos. Para propósitos de la generación de viajes, las áreas de estacionamiento internas no son incluidas.

Area Bruta Rentable (GRA o ABR): área medida desde el acabado interior de las paredes externas permanentes, incluyendo toda el área dentro de las fachadas de la edificación excluyendo escaleras, foso de ascensores, ductos, balcones y cuartos de aire acondicionado.

Area Neta Rentable (NRA o ANR): área cuantificada desde el acabado interior de las paredes externas permanentes, incluyendo toda el área dentro de las fachadas de la edificación excluyendo escaleras, foso de ascensores, ductos, balcones, cuartos de aire acondicionado, cuartos eléctricos, espacios para limpieza, corredores públicos, puestos de vigilancia y otros espacios no disponibles para inquilinos o para uso del personal de servicio.

Atracciones de Viajes: conjunto de destinos de los viajes dentro de un modelo de Generación de Viajes. Incluye los extremos residenciales y no residenciales.

Centro Comercial: grupo integrado de establecimientos comerciales que han sido planificados, desarrollados y gerenciados como una unidad. Su composición está relacionada con su área de mercado en términos de tamaño, localización y tipo de comercios, también proporciona al lugar donde se localiza facilidades de estacionamiento para atender sus propias necesidades. Actúan "...como si fueran verdaderas zonas de tránsito, con alto nivel de atracción de viajes."⁴

Coefficiente de Correlación (R): medida del grado de asociación lineal entre dos variables. Indica el grado en que cada valor estimado por el modelo explica las variaciones en los valores individuales observados de la variable independiente

⁴ NETO, Ismael Ulysséa y Beatriz NOZARI. "Influência de um Shopping Center sobre a Atração de Viagens com Motivo Trabalho, à Zona de Tráfego de sua Implantação". En Actas del 8º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Volume II. ANPET, Brasil, 1994. Pág. 52

desde su valor promedio. Sus magnitudes numéricas varían desde -1 a +1, con los valores absolutos más altos representando los mayores grados de asociación lineal.

Coefficiente de Determinación (R^2): fracción decimal de la variable dependiente que es explicada por los cambios en las variables independientes del modelo. Se puede expresar como un porcentaje. Varía entre 0 y 1, si se aproxima a 1 la estimación obtenida tiene mayor relación con las variables incluidas y por tanto el modelo es mejor, por el contrario a medida que su valor se aproxima a 0, el modelo es más deficiente.

Demanda de Transporte: número agregado de viajes que desea efectuar la población de una determinada área. Es el conjunto de desplazamientos que se realizan efectivamente desde una zona a los diferentes puntos de la zona urbana a través de los diferentes modos de transporte.

Modelo: formulación matemática desarrollada para reproducir las relaciones entre dos o más variables.

Nivel de Servicio: medida de eficiencia que relaciona la oferta del sistema de transporte (red vial o modos de transporte) con el volumen de demanda que la utiliza para hacer efectivo los viajes entre pares origen-destino.

Patrón de Viajes: modelo que refleja el comportamiento de la población en relación a sus necesidades de desplazamiento, incluyendo sus características espaciales y temporales.

Producciones de Viajes: conjunto de orígenes de los viajes dentro de los modelos de Generación de Viajes. Pueden ser o no ser extremos residenciales.

Promedio en Día Laboral de Extremos de Viaje en Vehículo: promedio de viajes de vehículos diarios contabilizado desde y hacia un generador de Lunes a Viernes.

Sistema de Transporte Urbano: “...gama total de oportunidades en lo que respecta al movimiento de personas y bienes entre distintos puntos de la región urbana.”⁵

Supermercados: establecimientos al detal de libre acceso que comercializan un amplio surtido de alimentos, productos embazados y artículos de limpieza y utilitarios.

Tasa Promedio de Viajes: promedio ponderado del número de viajes o extremos de viaje de vehículos por unidad de la variable independiente utilizada. Es calculada sumando todos los viajes y todas las unidades de la variable independiente, y dividiendo la primera sumatoria entre la segunda. Debido a la varianza de cada grupo de datos o unidad de generación, la tasa promedio ponderado se usa en vez del promedio de las tasas individuales.

Tasa Promedio de Viajes en Día Laboral: promedio ponderado de los viajes de vehículo de lunes a viernes, durante todo el día.

Tasa Promedio de Viajes en Domingo: promedio ponderado de viajes vehiculares generados durante todo el día domingo.

Tasa Promedio de Viajes en Domingo en la Hora Pico del Generador: promedio ponderado de viajes de vehículos generados el domingo durante la hora de mayor volumen de tránsito entrando y saliendo de la actividad. Puede ocurrir en la mañana o la tarde.

Tasa Promedio de Viaje para la Hora Pico del Generador: promedio ponderado de generación de viajes de vehículos durante la hora de mayor volumen de tránsito entrando y saliendo del generador, en la mañana o en la tarde. Esta puede o no coincidir en tiempo o volumen con la tasa de viaje para la hora pico del tránsito de la vialidad adyacente. Será igual o más grande que la tasa de viajes de la hora pico entre las 7 y las 9 a.m. y las 4 y las 6 p.m.

⁵ WINGO, Lowdon. “*Transporte y Suelo Urbano*”. Colección Nuevo Urbanismo, OIKOS-TAU. Washington, D.C., 1972. Pág. 33

Tasa Promedio de Viaje para la Hora Pico del Tránsito en la Vialidad

Adyacente: promedio ponderado de generación de viajes vehiculares para una hora entre las 7 y las 9 a.m. y entre las 4 y las 6 p.m. cuando la combinación del tránsito del generador y el de las vías adyacentes es el más alto. Si el volumen en la vialidad adyacente no es conocido, esta tasa representa el mayor volumen horario de extremos de viaje de vehículos generado por la actividad durante el tradicional período pico señalado.

Tasa Promedio de Viajes en Sábado: promedio ponderado de viajes vehiculares generados durante todo el día sábado.

Tasa Promedio de Viajes en Sábado en la Hora Pico del Generador:

promedio ponderado de viajes de vehículos generados el sábado durante la hora de mayor volumen de tránsito entrando y saliendo de la actividad. Puede ocurrir en la mañana o la tarde.

Variable Independiente: unidad física, medible y predecible que cuantifica el área de estudio o el generador, que puede ser utilizada para estimar el valor de una variable dependiente.

Viaje o Extremo de Viajes: movimiento vehicular unidireccional bien sea con el origen o el destino (saliendo o entrando) en el generador. Para propósitos de generación de viajes, los extremos de viaje totales para una actividad en un período determinado de tiempo son el total de todos los viajes entrando y saliendo en ese lapso.

Volumen Hora Pico AM y PM de la Vialidad Adyacente: es el volumen de tránsito horario más alto en la vialidad adyacente durante la mañana y la tarde.

II.3. LOS MODELOS DE ESTIMACION DE LA GENERACION DE VIAJES

La construcción de modelos para estimar la generación de viajes, como se señaló anteriormente, utiliza las relaciones observadas entre el número de viajes, en tanto variable dependiente, y factores relacionados con las actividades urbanas y las

condiciones socioeconómicas de la población, como variables independientes o explicativas, las cuales pueden ser recopiladas para el año base, y gracias a la hipótesis de permanencia temporal de estas relaciones, proyectadas al año horizonte que se requiera. Antes de su aplicación, el modelo debe ser calibrado utilizando las observaciones actuales para garantizar que cumpla con los propósitos predictivos para los cuales fue desarrollado y se obtenga una estimación futura confiable.

Los factores más importantes que influyen sobre la generación de viajes, y que se convierten por tanto en las variables independientes a usar en los distintos tipos de modelos, son, desde el punto de vista urbano, los usos de la tierra y sus intensidades, dentro de ellos los más importantes –por el volumen generado– son el residencial, la mayor parte de los viajes se originan en los hogares, seguido del comercial e industrial, por ser las fuentes de empleo. Con respecto a las características socioeconómicas de la población se consideran importantes el tamaño y estructura de la familia, la tenencia vehicular o tasa de motorización, la actividad de los residentes, es decir el número de personas empleadas, los ingresos familiares, y en algunas ocasiones el valor de la tierra o de la propiedad como aproximaciones al ingreso.

En el caso de las actividades urbanas como variables independientes son incorporadas en la mayoría de los modelos formulados a través de indicadores de área de terreno, construcción, rentable o alquilable, ya sea bruta o neta, número de viviendas totales o por tipo, número de locales comerciales o industriales, matrícula escolar, número de empleos, número de consultorios o camas de hospitalización, entre otros.

Las estimaciones de los distintos modelos pronostican el número de viajes referenciados a los extremos asociados, por una parte los que se originan en cada zona de estudio, o producciones de viajes, y por otra los que terminan en cada zona, o atracciones de viajes⁶.

⁶ Aún cuando en la literatura se hace distinción entre los conceptos de orígenes y producciones, por una parte, y destinos y atracciones, por otra, a los efectos de esta investigación se consideran similares.

Las características de los viajes son de gran importancia para la determinación del tipo de modelo que se debe formular y utilizar. El propósito del viaje y la hora en la cual este se realiza pueden definir la estructura del modelo a emplear en relación con el objetivo que se desea alcanzar en el estudio. En este sentido, los viajes al trabajo y a los centros educativos tienen características diferentes a los que se realizan hacia áreas comerciales o lugares de esparcimiento y recreación. Mientras los primeros tienen un carácter obligatorio pues responden a una necesidad impostergable que define igualmente su hora y frecuencia, los segundos son discrecionales y ocasionales teniendo cada persona mayor poder de decisión sobre el día, la hora y la regularidad con que efectuarlos. Por estas características es posible obtener mejores estimaciones si los modelos de generación se separan por propósito del viaje, ya que la bondad de los mismos mejora considerablemente. Además, comúnmente los modelos se estiman para la hora pico de la mañana y de la tarde, ya que son los períodos de mayor compromiso de la trama vial, cuando se realizan entre el 80 y 90% de los viajes laborales y educacionales; y para la hora valle, como un indicador que establece la diferencia con las horas pico, y permite definir el patrón de conducta ligado a la situación que se está estimando.

En los actuales procedimientos de planificación del transporte, el volumen de viajes es estimado separadamente para cada propósito y para diferentes períodos del día. Sin embargo, la formulación de modelos específicos conduce a un número muy elevado de posibles combinaciones de variables, por lo que se establecen compromisos en cuanto al tipo de viajes a modelar, seleccionando los de mayor interés para cumplir el objetivo particular del estudio, y con base en los recursos disponibles para la obtención de la información necesaria.

También es frecuente la construcción de modelos de producción y modelos de atracción por separado, ya que pueden utilizar diferentes tipos de variables, los primeros usan parámetros más ligados al hogar o la residencia, y los segundos a las actividades no residenciales y sus intensidades. Cuando se utilizan estos modelos diferenciados, al finalizar las estimaciones, debe realizarse un proceso que balancee producciones y atracciones, antes de iniciar la fase de distribución de viajes. Los

métodos para lograr el balance pueden desarrollarse a partir de mantener alguno de los dos valores estimados constante y ajustar el otro, o ajustar ambos. Es posible desarrollar igualmente modelos basados en viajes de personas o en viajes de vehículos.

Por otra parte, los estudios de planificación del transporte no pueden determinar los patrones de viajes de cada unidad residencial dentro de una zona. Por lo cual los patrones geográficos de viajes son resumidos a través de la sectorización de la zona en estudio, asociando los viajes estimados a estas unidades de relativa homogeneidad. Recientes modelos zonales de generación de viajes consideran que los sectores deben ser unidades muy pequeñas, ya que al usar los promedios de dichos sectores se puede perder la variación interzonal y afectarse la estimación si los mismos tienen un tamaño demasiado grande.

Actualmente, por la complejidad que implica la definición del tamaño adecuado de los sectores dentro de un estudio de transporte, se han desarrollado modelos basados en el hogar como unidad básica, bajo la premisa de que los hogares con similares características tienden a tener similar conducta de viajes sin importar su localización geográfica, así, la calibración de estos modelos emplea una muestra de hogares. Estos modelos son conocidos también como modelos desagregados porque descomponen cada sector en pequeñas unidades, pero no en términos geográficos, sino relacionando la interacción de los distintos tipos de hogares dentro de una zona, por lo que la descomposición no equivale necesariamente a pequeños sectores separables.

En estos modelos desagregados, para llegar a estimar la generación de viajes de una zona es necesario combinar la contribución de cada grupo homogéneo de hogares con el total de la misma, razón por la que los proyectos urbanos que proporcionan información para los modelos de generación deben especificar el número de hogares por tipo.

Para el desarrollo de modelos de generación de viajes existen cuatro formulaciones matemáticas: modelos de factores de crecimiento, modelos de regresión, modelos de análisis de tasas de viajes, y modelos de clasificación cruzada. Adicionalmente,

existen otros modelos, de reciente desarrollo, que combinan estas cuatro formulaciones básicas.

II.3.1. Modelos de Factores de Crecimiento

Estos modelos fueron los primeros desarrollados para estimar la generación de viajes, y actualmente solo se utilizan para predicciones a muy corto plazo o para calcular los viajes externos a una zona de estudio. De acuerdo a esta formulación el número de viajes futuros de una determinada zona es el resultado de los viajes actuales multiplicado por un factor de crecimiento. Su ecuación básica es:

$$V_{fi} = F_i \times V_{ai}$$

donde,

V_{fi} = viajes futuros de la zona i

F_i = factor de crecimiento de la zona i

V_{ai} = viajes actuales de la zona i

El reto dentro de este tipo de modelo es determinar el valor del factor de crecimiento o expansión. Este se construye relacionando, entre otros, los valores de población (P), ingreso (I) y tenencia vehicular o tasa de motorización (TV) actuales y futuros. Así la expresión que determina F_i es:

$$F_i = \frac{f^n (P_f, I_f, TV_f)}{f^n (P_a, I_a, TV_a)}$$

donde,

f_n = función multiplicativa

En el próximo acápite se analizarán las ventajas y desventajas de este modelo en relación con el resto de las formulaciones disponibles.

El procedimiento de estimación que propone este modelo es:

- 1º. Determinar los valores actuales y futuros de la población, el ingreso y la tenencia vehicular para cada zona y el volumen actual de viajes,
- 2º. Estimar el valor del factor de expansión F_i , y
- 3º. Aplicar la formulación del modelo para cada zona en estudio.

II.3.2. Modelos de Regresión

Los modelos de regresión pueden ser lineales o no lineales, dependiendo del tipo de relación que se establece entre las variables, y simples o múltiples, de acuerdo al número de variables involucradas. Todos estos modelos pueden ser utilizados en estudios de generación de viajes, y la selección de la forma más apropiada en un caso en particular se base en la experiencia de investigaciones preliminares en la materia.

Un modelo de regresión frecuentemente utilizado es el modelo de regresión lineal múltiple, que tiene la forma:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_r X_r$$

donde,

Y = variable dependiente

X = variables independientes relevantes o explicativas

α = parámetros que deben ser estimados previo a la aplicación del modelo

En un modelo de producciones de regresión lineal múltiple, la variable dependiente corresponde al total de viajes producidos por una zona P_1 si es un modelo agregado o zonal, o a la tasa de producciones por vivienda si es un modelo basado en el hogar. Las variables independientes incluidas en un modelo zonal son características de la zona en su conjunto, mientras que las empleadas por un modelo desagregado son características de las viviendas. La calibración del primero se basa en un conjunto de observaciones para un número de zonas, correspondiendo cada observación a una zona; y la calibración del modelo desagregado utiliza un número de observaciones que corresponden cada una a una vivienda de una muestra aleatoria tomada en el área en estudio. En el caso de modelos de regresión lineal múltiple de atracciones, las variables independientes son atributos no residenciales.

En todos los casos, cada término de la ecuación puede interpretarse como la contribución de la variable independiente asociada a la magnitud de la variable dependiente. De esta manera, un cambio en una unidad de una variable independiente produce un cambio de la variable dependiente igual a la magnitud

del coeficiente de la variable independiente. El término constante " α_0 " captura el efecto no incluido en el modelo.

Cuando se calibra un modelo de regresión lineal múltiple el investigador afronta las preguntas de cuántas y cuáles variables independientes incluir en la ecuación. En relación al número de variables independientes a ser consideradas, la experiencia ha demostrado que la ley de rendimientos decrecientes se mantiene con respecto a la precisión o exactitud resultante de incrementar el número de variables, es decir, se alcanza un punto más allá del cual el costo y la complejidad asociada a la adición de una nueva variable puede no garantizar mejoras en la exactitud de la estimación.

Por su parte, las variables explicativas seleccionadas deben:

1. estar linealmente relacionadas con la variable dependiente
2. estar altamente correlacionada con la variable dependiente
3. no correlacionarse estrechamente entre ellas
4. poder ser proyectadas con relativa facilidad

La primera regla establece que la relación entre una variable explicativa seleccionada y la variable dependiente debe ser lineal, tal como lo requiere la formulación matemática del modelo. Si no es así, se debe realizar una transformación de la variable explicativa, a través de aplicar logaritmo, extraer raíz o elevar a potencia, por ejemplo. La segunda regla señala que la variable independiente debe estar altamente asociada con la variable dependiente, en caso contrario, la variable no tendrá poder explicativo. La tercera regla establece que variables que están estrechamente correlacionadas entre sí no deben incluirse en la misma ecuación, ya que miden, esencialmente, el mismo efecto, y si las dos se incluyeran conllevarían a una doble consideración. Según la cuarta regla, las variables explicativas seleccionadas deben ser proyectadas para el año horizonte con relativa facilidad, pues es ésta la razón principal para recurrir al uso de modelos, que se calibran en términos de un grupo de factores (o variables independientes) que pueden ser proyectados con mayor facilidad que la variable dependiente.

Con estas consideraciones se reduce el número de modelos alternativos de generación de viajes. Luego debe seleccionarse el mejor modelo con base en pruebas estadísticas de bondad y la aplicación de la experticia profesional.

Las pruebas estadísticas más comunes que pueden ser aplicadas para la selección de un modelo de regresión lineal son el coeficiente de correlación múltiple “R”, que indica el grado de asociación entre las variables independientes y la dependiente; el coeficiente de determinación “R²”, que expresa el porcentaje de la variación de la variable dependiente explicado por las independientes; el error estándar de la estimación (EEE), el cual mide el grado de variación de los datos sobre la línea de regresión; la relevancia de los coeficientes de regresión, a través de la prueba “t” que determina el grado de contribución de las variables independientes; y el signo de estos coeficientes, los cuales deben expresar relaciones lógicas y esperables entre las variables. También debe evaluarse el valor de la constante “a₀” para evitar que sea ella quien esté estimando el mayor efecto o cambio en la variable dependiente.

En resumen para el desarrollo de estimaciones con un modelo de regresión deben seguirse los siguientes pasos:

- 1º. Seleccionar las variables a incluir a través de un análisis de correlación,
- 2º. Formular todos los posibles modelos de regresión,
- 3º. Definir el valor actual de las variables independientes incluidas en los modelos,
- 4º. Aplicar el análisis de regresión con los datos actuales de las variables independientes,
- 5º. Aplicar pruebas de bondad estadísticas a los modelos desarrollados,
- 6º. Seleccionar el modelo,
- 7º. Definir el valor futuro de las variables independientes incluidas en el modelo seleccionado, y
- 8º. Estimar los viajes generados por el área en estudio al horizonte temporal definido.

II.3.3. Modelos de Análisis de Tasas de Viajes

El análisis de tasas de viajes se refiere a modelos basados en la determinación de ratas promedio de producción o atracción de viajes asociadas con generadores importantes de una zona. Las tasas de generación se asocian con varias categorías de usos del suelo, y relacionan características de estas actividades con el número de viajes generados. Así, las tasas de viajes pueden expresarse en términos de viajes de personas por unidad de superficie para varios usos del suelo y localizaciones. Los usos del suelo incluyen tanto las categorías residenciales como no residenciales.

Las tasas de atracción se expresan, por ejemplo, en términos del número de viajes atraídos por empleado o de viajes a la escuela atraídos por estudiante matriculado en cada tipo de institución educacional.

La formulación matemática correspondiente es similar al modelo de factores de crecimiento:

$$V_{gi} = T_i \times V_{li}$$

donde,

V_{gi} = viajes generados por la actividad i

T_i = tasa de generación de la actividad i

V_{li} = variable independiente asociada a la actividad i
(unidad en la que se expresa la tasa de generación)

La Tasa de generación para cada actividad o uso de la tierra se obtiene dividiendo el número total de viajes generados por ese polo en la zona en la actualidad, entre la sumatoria de la variable independiente que se le asocia. Estas variables pueden ser áreas, viviendas, empleos, locales, etc. Así, la tasa se expresa:

$$T_i = \frac{\sum V_{gi} \text{ actuales}}{\sum V_{li} \text{ actuales}}$$

El mayor inventario de tasas de viajes para usos del suelo es suministrado por el Instituto de Ingenieros de Transporte en la publicación "Trip Generation" y sus continuas actualizaciones (se encuentra disponible la 6ta. Edición del año 97).

En el próximo capítulo se revisa en detalle todo el proceso de definición de las tasas de generación y la aplicación detallada del modelo de estimación que las utiliza.

II.3.4. Modelos de Clasificación Cruzada

Los modelos de clasificación cruzada o análisis de categorías pueden verse como simples extensiones de los modelos de tasas de viajes. Sin embargo, aunque pueden ser calibrados como modelos zonales, en estudios de generación de viajes son casi exclusivamente utilizados como modelos desagregados.

En el contexto de la generación residencial, la hipótesis que subyace es que se pueden establecer intervalos dentro de cada variable explicativa, de modo que todas las familias pueden ser descritas con un número limitado de categorías, así las viviendas son clasificadas según este conjunto de categorías correlacionadas con la producción de viajes. Luego a cada clasificación se le asocia una tasa de viajes, diferente para cada categoría, que es estimada por métodos estadísticos y asumida como estable en el tiempo, construyéndose con ellas una matriz de tasas de generación.

Cada celda de la matriz contiene la tasa calibrada de producciones de viajes diarias por vivienda expresada en términos de viajes de personas por vivienda por día. Contando con las proyecciones de la composición de las viviendas de las zonas para el año horizonte, la aplicación de este modelo calibrado con propósitos predictivos es simple, ya que solo debe multiplicarse la tasa correspondiente por el número de nuevas viviendas de cada categoría. El problema consiste en estimar este nuevo número de unidades por categoría.

En este modelo se consideran como variables explicativas de mayor relevancia las relativas a la propiedad vehicular, la estructura familiar y el ingreso. Es común también que se estimen modelos para diferentes propósitos de viajes, siendo la clasificación más utilizada la que separa los viajes en Viajes basados en el Hogar con destino Trabajo (HBW), Viajes basados en el Hogar con destino diferente al Trabajo (HBNW), y Viajes no basados en el Hogar (NHB).

Para el caso de las atracciones de viajes, igualmente pueden establecerse categorías por características del empleo localizado en una zona, en función de estándares industriales y comerciales, y la matrícula escolar por niveles.

De esta manera, para el desarrollo del modelo de clasificación cruzada deben realizarse las siguientes acciones:

- 1º. Seleccionar las variables que conformarán las categorías,
- 2º. Formular las clasificaciones por el conjunto de variables seleccionadas,
- 3º. Definir el número actual de hogares u otro indicador de atracción por categoría,
- 4º. Determinar la tasa de generación por categoría,
- 5º. Definir el número futuro de hogares u otro indicador de atracción por categoría, y
- 6º. Estimar los viajes generados por el área en estudio por categoría al horizonte temporal definido.

En la Tabla II.1. puede apreciarse un resumen de las principales características de los modelos anteriormente enunciados.

II.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS DE ESTIMACION

Para concluir la revisión de los modelos de generación de viajes desarrollados, se realiza a continuación un análisis comparativo de estas técnicas. En primer lugar se analizan los inconvenientes asociados a cada tipo de modelos para luego revisar las ventajas y desventajas de la utilización de unos sobre otros.

En el caso del modelo de Factores de Crecimiento, las principales deficiencias se deben a que:

- El factor no refleja las causas de los viajes.
- Es muy pobre conceptualmente en cuanto al análisis de las relaciones entre variables que condicionan la generación, por lo que no se considera conveniente su uso para pronósticos en áreas urbanas de rápida evolución.

Tabla II.1

Por su parte, los modelos de Regresión tienen inconvenientes debido a que:

- Los principales problemas son de carácter estadístico, pues se fundamenta en supuestos que pueden no coincidir siempre con la realidad. En este sentido, pueden encontrarse relaciones no lineales entre variables, por lo que se hace necesario realizar ajustes y transformaciones en ellas, para conseguir la linealidad. Y también es posible encontrar correlaciones muy altas entre variables independientes, que alteran la calidad de las estimaciones.
- Es imposible calcular todas las posibles modificaciones de las variables, por lo que no se pueden recomendar las ecuaciones más adecuadas para diferentes casos. Cada estudio debe desarrollar todo el proceso para determinar la que mejor se ajusta al objetivo.
- No puede establecer relaciones causales entre la variable dependiente y las independientes por la naturaleza empírica del modelo.
- Supone la permanencia de las relaciones entre las variables a través de la inalterabilidad de los coeficientes de regresión asociados. Desecha las modificaciones que posibles cambios en las características de las actividades urbanas y las condiciones socioeconómicas puedan tener sobre dichas relaciones. Por esto, las predicciones pueden ser confiables a corto plazo, pero en horizontes más prolongados no puede señalarse con exactitud el grado de exactitud de las proyecciones.
- Si se trata de modelos zonales de regresión, estos presentan problemas de agregación espacial, ya que al aumentar el tamaño de los sectores tiende a disminuir la variabilidad entre zonas, por lo que es indispensable asegurarse de que las subdivisiones reflejen adecuadamente una composición socioeconómica homogénea y expresen dicha variabilidad. En estos modelos el error residual está ligado al tamaño de las unidades, y es muy difícil determinar la dimensión ideal para reducirlo.

Los modelos que utilizan Tasas de Generación de Viajes presentan problemas como los siguientes:

- ❑ Las relaciones se establecen solo entre un par de variables, el número de viajes y el indicador que describe la actividad. Por esta razón es muy importante para el modelo la adecuada escogencia de la variable independiente que mejor refleje el comportamiento (mayor correlación).
- ❑ Es pobre en el caso de la actividad residencial, ya que ésta posee mayor relación con variables socioeconómicas que con características del uso del suelo.
- ❑ Mantiene constantes las relaciones entre las variables, al igual que el modelo de regresión, y al incluir solo una variable independiente, las estimaciones a largo plazo presentan mayor margen de error.
- ❑ Presenta limitaciones en reflejar las relaciones causales de la generación de viajes, en cuanto a todos sus componentes. Solo puede interpretar las vinculaciones ligadas a las variables urbanas.
- ❑ Requiere del análisis de cada categoría de usos de la tierra, ya que no es posible suponer la similitud en las condiciones de generación, aún en actividades del mismo tipo, pues ciertos umbrales modifican sustancialmente el patrón de viaje asociado. En el contexto urbano actual, construir una base de información que pueda cubrir todas las actividades existentes requiere de un esfuerzo técnico importante. Por eso es recomendado este modelo para casos particulares y puntuales.

Aún cuando es uno de los modelos de mayor utilidad en la actualidad la Clasificación Cruzada o Análisis de Categorías también tiene aspectos deficientes que resolver producto de que:

- ❑ Es necesario realizar extensos estudios con entrevistas domiciliarias para construir una base de información confiable para establecer, por una parte, las tasas de generación por categoría, y por otra, para definir el número de familias en cada clasificación. En este último caso, se requiere de una muestra

muy grande que garantice un mínimo de hogares por categoría, y aún así es posible que no se reflejen todas ellas.

- El incremento en el número de variables a incluir en las clasificaciones hace que la muestra de información a recopilar se incremente, ya que el número de categorías crece exponencialmente.
- Al igual que en el caso de los modelos de Regresión, supone la estabilidad de las relaciones entre las variables que maneja, por lo que mantienen los índices de generación por categoría fijos para la realización de proyecciones. Esta situación es aceptable para estimaciones cercanas en el tiempo, pero no es confiable a largo plazo.
- Para propósitos predictivos el mayor inconveniente se deriva de la necesidad de establecer el número de hogares por categoría a futuro. Los proyectos urbanos y los estudios socio-demográficos no manejan estas clasificaciones, y los instrumentos de que disponen no permiten realizar su estimación, por lo que es casi imposible obtener esta data a través de investigaciones o documentos de fuentes secundarias. Además, las características de las familias, principalmente en cuanto a composición, empleo e ingresos, están fuertemente condicionadas por factores sociales, políticos, culturales y económicos que varían con relativa frecuencia, más aún en países en desarrollo. Más aún, incluso se hace difícil establecer el número de hogares por categoría en la actualidad, ya que los mecanismos de recopilación de información son costosos y su aplicación no es constante y consistente.
- Desde el punto de vista estadístico el principal problema radica en la incapacidad de estos modelos para probar el grado de importancia o significación de las variables seleccionadas para establecer las clasificaciones con respecto a la realización de viajes.

Como puede apreciarse no existe ningún modelo que pueda representar la realidad con total exactitud por lo que los especialistas recomiendan que se utilice aquel que mejor se adapte al objetivo del estudio en el cual se utilizará.

Para concluir, en las tablas II.2, II.3 y II.4 se encuentran algunas consideraciones resumidas de este análisis comparativo.

Tabla

II.2

Tabla

II.3

Tabla II.4