

4. PROPUESTA METODOLÓGICA.

4.1. Introducción.

En este capítulo se propone una metodología para evaluar el Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda (SITOD) que sea de aplicación en cualquiera de las situaciones en las que se utilice este sistema de transporte (en áreas metropolitanas en expansión con problemas de congestión en el centro, en zonas con un servicio público convencional deficiente, o para grupos de población con movilidad reducida).

En cualquiera de las situaciones anteriormente expuestas se pueden encontrar tres tipos de posibles usuarios del SITOD:

- Los usuarios del vehículo privado (UVP). Se engloban dentro de vehículo privado a los usuarios del coche y a los de los demás modos de transporte diferentes al transporte público (moto, bicicleta, etc.) por tratarse todos ellos de sistemas de transporte privado y, por tanto, tener unas características similares (no se encuentran limitados, condicionados o restringidos por los horarios, frecuencias, itinerarios, etc., del transporte público)
- Los usuarios del transporte público (UTP)
- Y de forma excepcional, las personas que, por sus características personales, económicas o sociales, no realizaban ningún tipo de desplazamientos (PND) con anterioridad

Se describen y justifican los indicadores que utiliza la metodología que, dadas las diferencias existentes entre las características de los posibles usuarios, son necesariamente específicos para cada uno de ellos. A continuación se exponen las limitaciones de la metodología.

Dentro de las técnicas de investigación disponibles para la obtención de las variables y parámetros necesarios para aplicar la metodología propuesta, se justifica la selección de una encuesta específica como la más indicada para los fines perseguidos, dentro de la fase de recogida de datos.

4.2. Fases de la propuesta metodológica.

De acuerdo con lo dicho en los apartados anteriores, la metodología que se proponga debe cumplir los siguientes objetivos:

- Análisis y caracterización de los usuarios de cada uno de los modos de transporte que se utilizan en la zona de estudio.
- Análisis y caracterización del SITOD en la zona de estudio.
- Análisis de las diferencias significativas existentes entre el vehículo privado y el SITOD en la zona de estudio.
- Análisis de las diferencias significativas existentes entre el transporte público y el SITOD en la zona de estudio.
- Identificar y valorar las mejoras en accesibilidad que se producen con la puesta en funcionamiento de un SITOD en la zona de estudio.
- Determinar como afecta el SITOD en la movilidad de la población en la zona de estudio.
- Valorar el cambio modal que se produce debido a la implantación del SITOD en la zona de estudio.
- Evaluar el beneficio que obtienen los usuarios del servicio y la sociedad en general.

Para formalizar estos objetivos, se propone una metodología en cuatro fases:

1. Recogida de datos
2. Análisis estadístico
3. Construcción de indicadores específicos
4. Evaluación Multicriterio y medidas de gestión

4.2.1.- Recogida de datos.

Esta fase es fundamental para la obtención de los datos que posibilitan la realización de las fases posteriores. La calidad de los resultados que se obtengan está íntimamente ligada a la calidad de los datos que se recojan. Es por esta razón que se debe tener especial cuidado con las fuentes documentales así como con las técnicas de recogida de datos que se utilicen, siendo muy críticos y realizando tantas medidas de comprobación como sea posible.

Los datos fundamentales que se deben recoger son los siguientes:

- Datos sobre las infraestructuras y los sistemas de transporte existentes en el área objeto de estudio.
- Datos sobre el funcionamiento general del sistema: velocidades medias de recorrido, intensidades de circulación, personas transportadas, tiempos de recorrido, índices de ocupación, etc.
- Datos específicos sobre los sistemas de transporte público: tipos de sistemas de transporte público existentes, itinerarios, tarifas, frecuencias, etc.
- Patrones de movilidad en el área objeto de estudio: tasas de generación de viajes, distribuciones horarias, distribuciones modales, motivo de los viajes, origen y destino de los mismos.
- Datos socioeconómicos y demográficos de los residentes en el área de estudio, de sus viajes y motivos de su elección modal.

Los datos sobre las infraestructuras y los sistemas de transporte existentes en el área son bastante fáciles de obtener, y son imprescindibles para la obtención del resto de los datos necesarios para la evaluación del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda.

Los datos sobre el funcionamiento general del sistema se pueden obtener de los estudios realizados anteriormente por las Administraciones implicadas o de estudios que se hagan ad hoc para la implantación del sistema. Muchos de estos datos son actualizados de forma regular por las Administraciones responsables (Dirección General de Tráfico, Servicio de Conservación y Explotación de Carreteras del Ministerio de Fomento o de las Comunidades Autónomas, Diputaciones Provinciales y Ayuntamientos).

Los datos específicos sobre el funcionamiento de los sistemas de transporte público se puede obtener de las empresas concesionarias de estos servicios, Ayuntamientos, Comunidades Autónomas o, en caso de existir, de los Consorcios Regionales de Transportes.

Para la determinación de los patrones de movilidad en el área objeto de estudio, los datos sobre las características socioeconómicas y demográficas de los residentes, de sus viajes y motivos de elección modal, es necesario la realización de una campaña de encuestas o de entrevistas personales específicas en el área objeto de estudio. Estas encuestas contendrán datos de preferencias declaradas (PD) en el caso de que el estudio se realice para la puesta en marcha del sistema, y de preferencias reveladas (PR) en el caso de que se quiera estudiar un Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda que ya se encuentre en funcionamiento (Ortuzar & Willumsen, 1990).

En la realización de las encuestas o entrevistas es necesario considerar los siguientes aspectos: periodo temporal en el que se va a realizar (días y horas del día), diseño del cuestionario, elección del tipo de muestreo, tamaño de la muestra, y forma de realización.

Los viajes que se tratan de recoger en la encuesta o entrevista deben ser representativos. Está demostrado que las mejores épocas para la recogida de datos que cumplan con esta característica son la primavera y el otoño: el verano incluye vacaciones y en el invierno las condiciones climáticas inducen a un cambio en el comportamiento de los usuarios.

Con relación a los días y horas de realización de la encuesta o entrevista es necesario atenerse a la misma consideración anterior. El objetivo es la recogida de datos representativos, y los días y horarios dependerán del periodo o periodos de funcionamiento de este sistema de transporte. Si se aplica como sustituto del transporte público convencional, con los mismos horarios, los datos serán los de un día laborable medio, con lo que quedan excluidos los lunes y los viernes, siendo los más adecuados los martes, miércoles o jueves. Sin embargo, si se aplica como complemento al transporte público convencional, en aquellos días o franjas horarias en las que este no presta servicio, los días y horarios serán diferentes a los anteriormente señalados. Por tanto, según el caso objeto de estudio, habrá que elegir los días y horas que se consideren representativos.

De igual forma, la muestra habrá que elegirla en función de las personas o grupos de población que sean usuarios o potenciales usuarios de este sistema de transporte.

El tamaño de la muestra, la elección del tipo de muestreo y la forma de realización de la encuesta o entrevista, dependerá también de a quien vaya dirigido este sistema de transporte.

El diseño del cuestionario es fundamental para un correcto análisis posterior. La información básica a recoger es la siguiente:

- Caracterización de los viajes: motivo de los viajes, origen y destino, hora de salida y hora de llegada, modo de transporte, líneas de transporte público utilizadas, distancias a la parada más cercana y lugares de transbordo, posibilidad de aparcamiento en destino

- Caracterización de los usuarios: edad, sexo, ubicación dentro del hogar familiar (expresada en relación al cabeza de familia), posesión de carnet de conducir, disponibilidad de vehículo, actividad principal, nivel de estudios, minusvalías o incapacidades
- Identificación de las características del hogar: características de las viviendas, número de vehículos disponibles, ingresos mensuales, estructura familiar
- Identificación de las características de los modos: razones por las que utiliza el modo de transporte que declara y razones por las que no utiliza el resto de los modos disponibles
- Identificación de las características del SITOD: frecuencia de utilización del sistema, modo alternativo de viaje cuando no se utiliza, modo de viaje antes de la implantación de este sistema, razones por las que no utiliza el resto de los modos disponibles

Estas características deben recogerse a través de preguntas simples y directas y, si es posible, de forma cerrada.

4.2.2.- Análisis estadístico.

Los objetivos fundamentales para la realización de este análisis son los siguientes:

- Determinación de las características propias de los usuarios de los diferentes modos de transporte, es decir, determinación de un perfil de usuario para cada modo de transporte, haciendo especial énfasis en los usuarios del SITOD
- Determinación de las variables más relevantes a la hora de elegir un modo de transporte

- Preparación de la base de datos necesaria para las fases posteriores

4.2.2.1.- Determinación del perfil de usuario de cada modo de transporte.

Los análisis comúnmente más utilizados para la determinación del perfil de usuario de un modo determinado y las variables más relevantes a la hora de elegirlo son el análisis de la varianza (ANOVA) y el análisis discriminante. En tanto en cuanto el análisis discriminante arroja una probabilidad de elegir un modo u otro y esta probabilidad queda mejor cuantificada a partir de modelos de elección discretos (basados además en una sólida base teórica), el análisis que se propone se limita a un análisis de la varianza.

Los procedimientos estadísticos para la realización de este análisis dependen de la naturaleza de las variables que se investigan. En el presente caso, la variable sujeta a investigación es el modo de viaje. Esta variable es cualitativa no ordenada y de carácter discontinuo y discreto (es imposible que presente algún valor intermedio). Por tanto, el procedimiento adecuado para la realización del análisis de la varianza es el denominado de tablas de contingencia.

4.2.2.2.- Variables más relevantes a la hora de elegir un modo de transporte.

Dentro del conjunto de variables que definen los perfiles de los usuarios de los diferentes modos de transporte, habrá que identificar aquellas que tengan una mayor relevancia, es decir, aquellas que diferencien claramente a los usuarios de unos modos de transporte de los otros. Esto permitirá definir completamente los grupos de población usuarios de los diferentes modos de transporte y adoptar las medidas de gestión necesarias para la implantación, fomento y desarrollo de este sistema de transporte. Permitirá identificar necesidades que no se encuentran cubiertas, potenciales usuarios de este servicio, grupos de población que por sus características no es posible captar, etc.

Los análisis más utilizados para la determinación de las variables más relevantes a la hora de elegir un modo de viaje son los mismos que para la determinación del perfil de

usuario de cada modo de transporte. Y, al igual que en el caso anterior, el procedimiento más adecuado para el análisis de la varianza es el de las tablas de contingencia.

4.2.2.3.- Preparación de la base de datos.

Esta base de datos es imprescindible para la realización de la siguiente fase. Debe contener un registro con cada uno de los individuos entrevistados o encuestados, con sus características socioeconómicas y demográficas, las características de sus viajes actuales, las características de sus elecciones actuales, y las necesidades no satisfechas con los modos de transporte que utilizan normalmente.

Existen dos variables fundamentales que se obtienen de las encuestas o entrevistas, que deben ser tenidas en cuenta para la evaluación multicriterio: tiempo de viaje y dependencia del modo de transporte que utilizan (cautividad del transporte público por no disponer de carnet de conducir o de coche, o por incapacidad física; y cautividad del vehículo privado, por necesitarlo para desplazarse a lo largo de la jornada).

4.2.3.- Construcción de indicadores específicos.

Cuando se pone en marcha un nuevo sistema de transporte se pretende dar solución a problemas detectados con anterioridad. La evaluación del mismo, normalmente, se basa en la verificación o comprobación de que se hayan cumplido los objetivos para los cuales se puso en funcionamiento, en el caso de que se realice dicha evaluación a posteriori; o en la estimación del grado de cumplimiento de dichos objetivos, si la evaluación se realiza a priori. Para la medición o estimación del grado de cumplimiento de dichos objetivos, que pueden ser de muy distintos tipos (sociales, económicos, funcionales, políticos, etc.) y que en ocasiones pueden llegar a ser incluso contradictorios, se suelen utilizar una serie de variables que sean medibles o cuantificables. Cuanto mayor sea el número de objetivos que se persigan, mayor tendrá que ser el número de variables utilizadas.

Dada la gran cantidad de variables que hay que considerar, se puede observar la dificultad de aplicar métodos unicriterio para la evaluación de este sistema de transporte, lo cual nos lleva a la utilización de métodos en los que se evalúa la consecución de un cierto número de objetivos simultáneamente, que es lo que se conoce como métodos multicriterio.

Una fase necesariamente previa al proceso de evaluación es la formulación de los objetivos que se persiguen con la implantación de un Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda. Los objetivos principales son los siguientes:

- Aumento de la accesibilidad y de la movilidad. Para ello se identificarán viajes que no se realizaban con anterioridad a la puesta en funcionamiento del sistema y las disminuciones en los tiempos de viaje de los usuarios del mismo
- Obtención de un cambio modal positivo. Se considera que el cambio modal es positivo cuando se produce hacia modos de mayor ocupación (del vehículo privado al transporte público o al SITOD) y negativo cuando se produce hacia modos de menor ocupación (del transporte público hacia el SITOD o hacia el vehículo privado)
- Obtención un beneficio económico y medioambiental para los usuarios y la sociedad en general. Se considera que se produce un beneficio económico para los usuarios del SITOD cuando sus costes de transporte son inferiores a los que tenían antes de la puesta en funcionamiento de este sistema. Se considera que se produce un beneficio para la sociedad cuando disminuye la contaminación atmosférica y acústica.

Para la posterior valoración del grado de cumplimiento de dichos objetivos es preciso establecer una serie de indicadores para cada uno de los mismos y un método de cálculo para su medición cuantitativa.

Los indicadores utilizados para la cuantificación de los criterios de evaluación se calculan por la variación entre la situación de referencia (escenario base) y el escenario que incorpora el proyecto objeto de evaluación (situación con SITOD).

Los indicadores son específicos para cada una de los objetivos que se han propuesto.

4.2.3.1.- Estudio de la accesibilidad.

4.2.3.1.1.- Práctica existente.

Según Ingram (1971) el concepto de accesibilidad está, de forma general, relacionado con las facilidades y dificultades de llegada o salida desde cierto punto dentro de una región.

Según Monzón (1988) los indicadores de accesibilidad pretenden dar una medida de la separación de actividades o asentamientos humanos que se encuentran conectados entre sí mediante un sistema de transportes.

Desde una perspectiva basada en las necesidades, se entiende el concepto de accesibilidad desde un punto de vista social, y no meramente locacional (Gutiérrez Puebla, 1991). En este sentido se puede hablar de accesibilidad personal, frente al concepto clásico de accesibilidad locacional.

La accesibilidad se ha utilizado también como instrumento de prognosis (Izquierdo & Monzón, 1992): desarrollo demográfico e incremento de salarios (Wendt & Kau, 1976), distribución geográfica de los empleos (Black & Conroy, 1977), densidad de población (McDougall, 1978), etc.

La descripción de las diferentes medidas de la accesibilidad que se han venido empleando no es tarea sencilla pues la diversidad de casos lleva a formulaciones muy distintas, que aparentemente tienen poco en común. Pirie (1979) afirmaba que “es posible que todo el mundo entienda la misma cosa por accesibilidad y simplemente

resulte que puede ser medida de varias formas, o que debe ser medida de varias formas dadas las peculiaridades o limitaciones del problema”.

Siguiendo, de alguna manera, el itinerario histórico de aparición de los estudios donde se han empleado los indicadores de accesibilidad, puede decirse que ese término ha tenido las siguientes opciones (Izquierdo & Monzón, 1992):

- 1) En los primeros estudios significa simplemente la separación espacial de un punto a otro, o a todos los demás dentro del área de estudio. Así, la accesibilidad de un punto se entendía en función de su localización relativa respecto a los demás puntos del sistema.
- 2) En trabajos posteriores se considera la accesibilidad como número de posibilidades que se tienen de tomar parte en ciertas actividades.
- 3) En estudios más recientes se identifica la accesibilidad con el beneficio neto que un grupo de personas obtiene por estar en una determinada localización y poder utilizar un sistema de transportes concreto.

No es fácil hacer una clasificación general de los tipos de medidas de la accesibilidad, pues los indicadores participan muchas veces de las propiedades comunes a varios tipos de medidas.

Las medidas topológicas son las más sencillas, y tienen en común que sólo consideran la red de transportes o comunicaciones de la zona de estudio (Izquierdo & Monzón, 1992). Los indicadores utilizados en este tipo de medidas son: Presencia/Ausencia de una vía de comunicación; densidad de malla, que indica la “cantidad” de vías de comunicación existentes en una determinada zona; y el Factor de Ruta, que trata de medir la “calidad” del trazado.

Sin embargo, los más completos, y más utilizados recientemente, son los indicadores de gravedad, que deben su nombre a la analogía que existe entre su formulación y las leyes

de la física de la materia, y los indicadores de oportunidades acumuladas, que permiten determinar el número de destinos de un tipo concreto que se pueden alcanzar en un tiempo determinado.

Hansen (1959) define la accesibilidad integral de un área i como:

$$A_i = \sum_{j=1}^m A_{ij} \quad (1)$$

siendo:

$$A_{ij} = \frac{E_j}{d_{ij}^b} \quad (2)$$

A_{ij} : índice de accesibilidad de la zona i respecto a la zona j

E_j : número total de empleos en la zona j

d_{ij} : distancia entre las zonas i y j

m: número de zonas del área de estudio

b: parámetro de calibración

Hirschman y Henderson (1990) definen la accesibilidad de la zona j como:

$$A_j = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{t_{ij}^a} \quad (3)$$

siendo:

E_i : número de empleos en cada zona i

t_{ij} : tiempo de viaje entre las zonas i y j

a: factor de calibración

Este modelo fue aplicado en el área metropolitana de New York, para estudiar la implantación de una nueva vía entre los barrios de Brockport y Albion.

Según el Manual para la Evaluación de las Inversiones de Transporte en las Ciudades (MFOM, 1996) “*el concepto de accesibilidad (...) se asocia a la posibilidad que un individuo o tipo de persona, situado en una determinada localización espacial, tiene para tomar parte en una actividad particular o conjunto de actividades*”. La accesibilidad se asocia a la “oportunidad” de viaje.

El concepto de accesibilidad, así definido, puede ser representado, en cuanto a accesibilidad general, por la variación del siguiente indicador entre el escenario base y el escenario que incorpora el proyecto objeto de evaluación.

$$A_G = \sum_i P_i \sum_j B_j f(C_{ij}) \quad (4)$$

Donde:

A_G : Accesibilidad global del área

P_i : Población de la zona i

B_j : Empleos de la zona j (u “oportunidades”: empleos, puestos escolares, ...)

$f(C_{ij})$: Función de coste generalizado de viaje, en el modo de transporte considerado, entre la zona i y la zona j

El indicador de evaluación será:

$$\Delta A_G = \frac{A_G^p - A_G^o}{A_G^o} \quad (5)$$

Siendo:

ΔA_G : Incremento de la accesibilidad global

A_G^o : Accesibilidad global en el área en el escenario base

A_G^p : Accesibilidad global en el área en el escenario con proyecto

El criterio de accesibilidad global de una aglomeración así definido, presenta, no obstante, bastantes similitudes con el ahorro global de tiempo de los usuarios del sistema de transporte.

Existen también indicadores de accesibilidad zonal, que tienen en cuenta las diferencias de accesibilidad existentes entre las distintas zonas de una aglomeración urbana, y la evolución de la misma al implantar un determinado proyecto.

Según Barcellos et al. (2000) se puede definir un indicador de accesibilidad en función del tiempo de viaje, número y capacidad de las rutas. El tiempo de viaje fue seleccionado por su utilidad en la decisión del usuario y por ser utilizado (explícita o implícitamente) en la mayoría de los modelos. El número de rutas fue escogido porque la existencia de varias rutas entre las diferentes áreas significa una mayor oferta de medios de transporte y por consiguiente una mayor atracción para realizar el viaje. Y la capacidad de las rutas fue considerada teniendo en cuenta que cuanto mayor es la capacidad de las rutas, mayor será la facilidad de tráfico y por consiguiente de acceso.

De esta forma se puede definir una función de accesibilidad (A) de la siguiente manera:

$$A = f(t, n, c) \quad (6)$$

donde:

- t: tiempo de viaje entre las zonas
- n: número de rutas entre las zonas
- c: capacidad de las rutas

El índice de accesibilidad que define es el siguiente:

$$A_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n c_{ijk}}{1.000} \times \left(\frac{\sum_{k=1}^n t_{ijk}}{n} \right)^{-1} \quad (7)$$

donde:

- A_{ij} : accesibilidad entre las áreas i y j
- c_{ijk} : capacidad del elemento de la ruta k entre i y j
- t_{ijk} : tiempo de viaje entre las zonas i y j en la ruta k
- n: número de rutas

Kerrigan & Bull (1992) definen un indicador de accesibilidad para el transporte público basado, exclusivamente, en el tiempo de acceso, desde un punto dado, a las estaciones o paradas de autobús que se encuentran a una distancia inferior a la que se recorre caminando en 15 minutos. Utilizan como variables la distancia a las estaciones o paradas de autobús, el número de paradas o estaciones que se encuentran a menos de 15 minutos andando, la frecuencia y fiabilidad de los servicios, la velocidad media de la marcha a pie, y la hora del día y el día de la semana. Este indicador lo aplican en el municipio londinense de Hammersmith & Fulham para identificar las necesidades de accesibilidad del transporte de público.

En 1996, Echeverria et al. utilizan un indicador de tipo gravitatorio exponencial, que denominan *accesibilidad absoluta*, para identificar las zonas del Área Metropolitana de Madrid que tienen una mejor accesibilidad en transporte público. Este indicador es el siguiente:

$$A_i = \sum_j \frac{D_j}{e^{T_t^{ij}}} \quad (8)$$

donde:

- A_i : accesibilidad de la población al empleo o viceversa
- D_j : número de viajes atraídos (generados) por la zona j en cualquier medio de transporte
- T_t^{ij} : tiempo medio de viaje, en transporte público entre i y j

$$T_t^{ij} = 2,0 \cdot t_a + 1,2 \cdot t_e + 1,5 \cdot t_s + t_v \quad (9)$$

siendo T_t^{ij} el tiempo o los costes medios:

- t_a : tiempo de acceso en modos auxiliares
- t_e : tiempo de espera en la parada (0,5 x frecuencia del servicio)
- t_s : tiempo de dispersión
- t_v : tiempo en el vehículo

4.2.3.1.2.- Limitaciones.

El Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda tiene unas características propias que no le permiten utilizar directamente ninguno de los indicadores de accesibilidad anteriormente expuestos. Estas características son las siguientes:

- No modifica las distancias entre los orígenes y destinos
- No crea nuevas “oportunidades” de viaje (empleos, puestos escolares, ...)
- No modifica o redistribuye las “oportunidades” de viaje dentro de una zona en incipiente descentralización
- No genera rutas alternativas o diferentes a las que ya son utilizadas por los vehículos privados
- No aumenta el número de rutas ni la capacidad de las mismas

Será necesario, por consiguiente, construir un indicador nuevo que se adapte a las características propias del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda.

4.2.3.1.3.- Propuesta de indicador.

Como se ha podido observar, el denominador común de todos los indicadores estudiados con anterioridad es el tiempo de viaje, expresado de forma explícita o de forma implícita dentro de las distancias de separación entre zonas.

Respecto a las variables que utilizan los indicadores anteriormente analizados, el Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda únicamente va a modificar los tiempos de viaje de los usuarios. Por esta razón se plantea un indicador que dependa exclusivamente del tiempo total de recorrido, en el que se debe incluir los diferentes tiempos en los que se puede dividir el viaje (tiempo en vehículo, tiempo de aparcamiento, tiempo a la parada más próxima, etc.).

Debido a las diferencias existentes entre los diferentes tipos de usuarios expuestos anteriormente, será necesario crear un indicador distinto para cada uno de ellos. Este indicador tendrá en cuenta el tiempo de viaje específico para cada uno de los usuarios (usuarios del vehículo privado, del transporte público y aquellas personas que antes no realizaban desplazamientos).

Para los UVP y los UTP se plantea un indicador en función del tiempo medio de viaje antes (o en el escenario base) y después (una vez puesto en funcionamiento el sistema) utilizando el SITOD. La variación media de la accesibilidad para los antiguos UVP y los antiguos UTP que cambian al SITOD será:

$$\Delta A_{\text{UVP}} = \frac{T^{\text{UVP}} - T^{\text{SITOD}}}{T^{\text{UVP}}} \quad (10)$$

$$\Delta A_{\text{UTP}} = \frac{T^{\text{UTP}} - T^{\text{SITOD}}}{T^{\text{UTP}}} \quad (11)$$

donde:

ΔA_{UVP} : variación media de la accesibilidad para los usuarios del vehículo privado que cambian al SITOD

ΔA_{UTP} : variación media de la accesibilidad para los usuarios del transporte público que cambian al SITOD

T^{UVP} : tiempo medio total de desplazamientos para los usuarios del vehículo privado en el escenario base o antes de la puesta en servicio del SITOD

T^{UTP} : tiempo medio total de desplazamientos para los usuarios del transporte público en el escenario base o antes de la puesta en servicio del SITOD

T^{SITOD} : tiempo medio total de desplazamientos para los usuarios del SITOD después de la puesta en servicio del sistema

Matemáticamente, en el límite, estos indicadores pueden variar entre 1 y $-\infty$. Tomarán el valor 1 cuando el tiempo de viaje después de la puesta en servicio de este sistema sea nulo, y el valor $-\infty$ cuando el tiempo de viaje después de la puesta en servicio del sistema sea infinito.

La primera posibilidad, que representa el máximo incremento de accesibilidad que se puede llegar a obtener, nunca se podrá dar, ya que, por muy próximos que se encuentren dos puntos (origen y destino), siempre existe una distancia que los separa, y por tanto, es necesario un cierto tiempo para salvar esta distancia.

La segunda posibilidad, que representa la máxima pérdida de accesibilidad, también es hipotética, ya que, el tiempo de viaje entre dos puntos separados una distancia finita nunca puede ser infinito.

Normalmente se obtendrán valores comprendidos entre 1 y -1 . Los valores positivos indican un incremento en la accesibilidad y los negativos una pérdida de la misma. Estos últimos, que serán raros para los UTP porque con el SITOD los tiempos de desplazamiento normalmente se verán reducidos, si que pueden obtenerse para los UVP. Un valor nulo para la variación media de la accesibilidad indicaría que los tiempos de desplazamientos antes y después de la puesta en marcha del sistema son iguales.

Partiendo de la hipótesis de que los tiempos de recorrido en transporte público y en vehículo privado permanecen constantes después de la puesta en servicio del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda, se puede decir que las personas que no cambian de modo de transporte no verán modificada su accesibilidad.

Para las personas que no realizaban ningún tipo de desplazamientos antes de la puesta en marcha del SITOD, no se puede emplear un indicador de este tipo porque no se pueden obtener los tiempos de desplazamiento en el escenario base. Sin embargo, es lógico pensar que para estas personas la variación media de accesibilidad será máxima. Por tanto se puede decir que:

$$\Delta A_{PND} = 1 \quad (12)$$

Se puede definir la variación media de la accesibilidad (ΔA^*), de los usuarios que cambian al SITOD, como:

$$\Delta A^* = \frac{1}{U^*} \cdot (UVP^* \cdot \Delta A_{UVP} + UTP^* \cdot \Delta A_{UTP} + PND^* \cdot \Delta A_{PND}) \quad (13)$$

donde:

UVP* : antiguos usuarios del vehículo privado que utilizan el SITOD

UTP* : antiguos usuarios del transporte público que utilizan el SITOD

PND* : usuarios del SITOD que antes no realizaban desplazamientos

U* : número total de usuarios del SITOD

Estos indicadores de accesibilidad, que se podrían denominar agregados, utilizan los tiempos medios de desplazamiento en los diferentes sistemas de transporte. Permiten detectar diferencias entre los diferentes tipos de usuarios de forma global.

Para los usuarios del vehículo privado se tiene que T^{UVP} incluye el tiempo de recorrido en vehículo privado (t_{VP}) y el tiempo de aparcamiento (t_{park}), y T^{SITOD} incluye el tiempo de viaje en SITOD (t_{SITOD}) (si el trayecto se realiza sin recoger a ningún otro usuarios) y el tiempo necesario para recoger a otros usuarios (t_{rec}) (este tiempo dependerá del tipo de vehículo utilizado).

$$T^{UVP} = \frac{1}{UVP} \sum_1^{UVP} t_i^{UVP} \quad (14)$$

$$T^{SITOD} = \frac{1}{UVP^*} \sum_1^{UVP^*} t_i^{SITOD} \quad (15)$$

$$t_i^{UVP} = t_{VP}^i + t_{park}^i \quad (16)$$

$$t_i^{SITOD} = t_{SITOD}^i + t_{rec}^i \quad (17)$$

Siendo:

t_i^{UVP} : tiempo total de desplazamiento para un usuario del vehículo privado en el escenario base o antes de la puesta en servicio del SITOD

t_i^{SITOD} : tiempo total de desplazamiento para el usuario i utilizando el SITOD

Para los usuarios del transporte público, T^{UTP} incluye el tiempo hasta la parada o estación más cercana (t_{ap}), el tiempo de espera en la parada (t_{esp}) que dependerá de la frecuencia de la línea de transporte público, el tiempo de recorrido en el transporte público (t_{TP}), el tiempo empleado en los transbordos (t_{tr}), y el tiempo desde la parada hasta el destino del viaje (t_{dp}). El T^{SITOD} incluye los mismos conceptos indicados para los usuarios del vehículo privado.

$$T^{UTP} = \frac{1}{UTP} \sum_1^{UTP} t_i^{UTP} \quad (18)$$

$$T^{SITOD} = \frac{1}{UTP^*} \sum_1^{UTP^*} t_i^{SITOD} \quad (19)$$

$$t_i^{UTP} = t_{ap}^i + t_{esp}^i + t_{TP}^i + t_{tr}^i + t_{dp}^i \quad (20)$$

Siendo:

t_i^{UTP} : tiempo total de desplazamiento para un usuario del transporte público en el escenario base o antes de la puesta en servicio del SITOD

Estos indicadores agregados pueden provocar una pérdida de información si los orígenes y destinos de los viajes son muy diferentes, y por tanto las distancias recorridas y tiempos empleados son distintos. Se pueden plantear unos indicadores desagregados, que midan los cambios en la accesibilidad de cada persona estudiada y que, mediante una agregación posterior, permitan obtener la variación de la accesibilidad total.

A partir de estos indicadores es posible obtener más información sobre las variaciones de accesibilidad según el tipo de usuario. Además de las variaciones medias, se puede obtener la varianza y la desviación típica para los diferentes tipos de usuarios.

Para cada usuario, se determina como se ve modificada su accesibilidad:

$$\Delta a_i^{UVP} = \frac{t_i^{UVP} - t_i^{SITOD}}{t_i^{UVP}} \quad (21)$$

$$\Delta a_i^{UTP} = \frac{t_i^{UTP} - t_i^{SITOD}}{t_i^{UTP}} \quad (22)$$

siendo:

Δa_i^{UVP} : incremento de la accesibilidad para el usuario i que antes utilizaba el vehículo privado

Δa_i^{UTP} : incremento de la accesibilidad para el usuario i que antes utilizaba el transporte público

Al igual que ocurría para los indicadores agregados, una persona que no realizase desplazamientos antes de la puesta en funcionamiento del SITOD tendrá un incremento de accesibilidad máximo:

$$\Delta a_i^{PND} = 1 \quad (23)$$

En este caso, la variación media de accesibilidad de los usuarios que cambian al SITOD, será:

$$\Delta A^* = \frac{1}{U^*} \sum_{i=1}^{U^*} \Delta a_i \quad (24)$$

Se puede determinar también la variación media de la accesibilidad para los usuarios del vehículo privado que cambian al SITOD:

$$\Delta A_{UVP} = \frac{1}{UVP^*} \sum_{i=1}^{UVP^*} \Delta a_i^{UVP} \quad (25)$$

De igual modo, se puede determinar la variación media de la accesibilidad para los usuarios del transporte público que cambian al SITOD:

$$\Delta A_{UTP} = \frac{1}{UTP^*} \sum_{i=1}^{UTP^*} \Delta a_i^{UTP} \quad (26)$$

Se cumple que:

$$U^* = UVP^* + UTP^* + PND^* \quad (27)$$

Si se quiere determinar la variación en la accesibilidad global (ΔA), entendiendo como tal, la variación media para todos los usuarios estudiados, cambien o no de modo de transporte, se tiene:

$$\Delta A = \frac{1}{U} \sum_{i=1}^U \Delta a_i \quad (28)$$

siendo U el número total de usuarios estudiados. Los usuarios que no cambian de modo de transporte ($U - U^*$) tendrán una variación de la accesibilidad nula ($\Delta a_i = 0$).

4.2.3.2.- Estudio de la movilidad.

4.2.3.2.1.- Práctica existente.

El término movilidad es ampliamente utilizado en múltiples contextos con significados que pueden ser algo diferentes. En muchas ocasiones se utiliza movilidad más o menos como sinónimo de viaje. Cuando se refiere a un individuo concreto, además de este

significado, puede tener connotaciones referentes a su capacidad para realizar los mismos.

Existen múltiples índices o ratios de movilidad en la literatura. Según las necesidades o los datos disponibles por cada autor se han utilizado unos índices u otros. Algunos de los más utilizados son los siguientes:

- Albors (1998), en su estudio de la gestión de la movilidad en Barcelona, utiliza el número de plazas ofertadas por kilómetro
- Blanco (1998), en su estudio sobre la movilidad en aglomeraciones urbanas en Andalucía, utiliza varios indicadores: número total de etapas, número total de viajes, número de viajes a pie y motorizados, número de etapas por persona, de viajes por persona, de viajes mecanizados por persona, número de viajes y viajes mecanizados por familia
- López (1996) utiliza el número de viajeros por kilómetro, el número de viajes diarios, el número de viajes diarios a pie y motorizados
- Prat (2000) utiliza la intensidad media diaria de vehículos y el número de viajes diarios
- Rocillo et al. (2000) también utiliza el número de viajes diarios
- Steininger et al. (2000) utiliza el número de kilómetros recorridos a la semana por cada persona

Como se puede observar, los indicadores son múltiples, sencillos, y adaptados a las necesidades del estudio. En todos aparece de forma explícita o implícita el número de viajes. En prácticamente todos, también aparece una unidad de tiempo, que generalmente es la semana o el día.

Los datos sobre la movilidad actual de una determinada zona se pueden obtener a través de encuestas o estudios de movilidad. Sin embargo, cuando lo que se pretende es evaluar como se va a ver afectada la movilidad debido a la puesta en marcha de un nuevo sistema de transporte, se pueden utilizar modelos de generación de viajes como los que se exponen en el Manual para la Evaluación de Inversiones de Transporte en las Ciudades (MFOM, 1996).

Los viajes generados por una familia determinada se obtienen mediante una expresión general del tipo:

$$O_i = f (X_1, X_2, \dots) \quad (29)$$

Siendo:

O_i : viajes generados por la familia i

X_1, X_2 : variables explicativas de la generación de viajes

No es posible determinar a priori el número de variables explicativas, porque su elección definitiva dependerá del grado de ajuste que se consiga con el modelo propuesto. Se emplearán inicialmente aquellas que tengan una mayor influencia en la generación de viajes (tamaño familiar, índice de motorización, nivel de renta, número de activos en la familia, número de escolares, etc.)

La fuente principal de información para calibrar estos modelos será una Encuesta Domiciliaria de Movilidad en el área de estudio. Con estos datos se ajustarán las ecuaciones anteriormente vistas, para cada tipo de familia, con diferentes combinaciones de variables, escogiéndose aquella que muestre un mejor ajuste.

Con estos modelos calibrados, y mediante una proyección previa de las variables explicativas, se obtendrán el número de viajes por familia.

4.2.3.2.2.- Limitaciones.

El hecho de que no exista una unicidad patente o un acuerdo en el uso de un indicador determinado, parece indicar que ninguno de ellos se adapta bien a cualquier situación objeto de estudio. Según el escenario se utilizará uno u otro.

Los métodos que se utilizan para la previsión de los viajes, no son completamente fiables. Para estimar los viajes futuros se utilizan unas fórmulas que los determinan en función de una serie de variables explicativas. El problema de la prognosis de los viajes lo trasladan a la prognosis de las variables explicativas. Aunque estas variables puedan ser pronosticadas con un mayor grado de confianza que los viajes futuros, siguen siendo variables que no han sido medidas y que por tanto tienen un margen de error.

Se debe ser consciente, por tanto, de que para calcular correctamente las variaciones en la movilidad de las personas de una zona determinada, es necesario realizar una encuesta de preferencias reveladas o un estudio de movilidad antes y después de la puesta en funcionamiento del sistema de transporte.

4.2.3.2.3.- Propuesta de indicador.

En este apartado se propone el indicador que mejor se adapte a las características del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda.

En consonancia con los indicadores vistos, el número de viajes debería aparecer en el indicador. También es necesario acotar la unidad temporal que podría ser el día. Y para evitar que se puedan producir distorsiones propias de grandes números (Barcellos, 2000), se utilizaran los viajes por persona.

Por tanto, se escoge como indicador de la movilidad el número de viajes diarios por persona que se realizan en el área objeto de estudio.

Al igual que para los indicadores de accesibilidad, se plantea un indicador para evaluar las modificaciones en la movilidad en el área en función del número de viajes por

persona diarios antes (o en el escenario base) y después (utilizando el SITOD). También aquí se considera que las personas que no cambian de modo de transporte no verán modificada su movilidad.

La variación de la movilidad para los usuarios del tipo i será:

$$\Delta M_i = \frac{N_p^i - N_o^i}{N_p^i} \quad (30)$$

con $i = \text{UVP, UTP, PND}$

donde:

ΔM_i : modificación de la movilidad para los usuarios del tipo i que cambian al SITOD

N_o^i : número medio de viajes por persona y día para los usuarios de tipo i en el escenario base o antes de la puesta en servicio del SITOD

N_p^i : número medio de viajes por persona y día para los usuarios de tipo i después de la puesta en servicio del SITOD

Matemáticamente, en el límite, estos indicadores pueden variar entre 1 y $-\infty$. Tomarán el valor 1 cuando el número medio de viajes por persona y día en el escenario base sea nulo, y el valor $-\infty$ cuando el número medio de viajes por persona y día después de la puesta en servicio del sistema sea cero.

La primera posibilidad, que representa el máximo incremento de movilidad que se puede llegar a obtener, se dará para las personas que antes no realizaban ningún tipo de desplazamientos (PND).

La segunda posibilidad, que representa la máxima pérdida de movilidad, es hipotética, ya que, si se aumentan el número de alternativas de sistemas de transportes en un área

determinada, normalmente, la movilidad aumentará, y en el caso de que disminuya, nunca llegará a ser nula.

Normalmente se obtendrán valores comprendidos entre 1 y -1. Los valores positivos indican un incremento en la movilidad y los negativos una pérdida de la misma. Estos últimos son, en general, raros por la razón que se acaba de exponer, aunque se pueden obtener en el caso de que se produzca una mejor gestión de los desplazamientos realizados (se aproveche un mismo desplazamiento para varios fines). Un valor nulo para la variación de la movilidad indicaría que el número medio de viajes por persona y día antes y después de la puesta en marcha del sistema son iguales.

Igual que para la accesibilidad, se puede definir la variación media de la movilidad de los usuarios que cambian al SITOD (ΔM^*), como:

$$\Delta M^* = \frac{1}{U^*} \cdot (UVP^* \cdot \Delta M_{UVP} + UTP^* \cdot \Delta M_{UTP} + PND^* \cdot \Delta M_{PND}) \quad (31)$$

Estos indicadores de movilidad, que se podrían denominar agregados, utilizan el número medio de viajes por persona y día, diferenciando entre los distintos tipos de usuarios en el área objeto de estudio. Permiten detectar diferencias entre los distintos tipos de usuarios.

Aunque tienen menor interés que para el caso de las variaciones en la accesibilidad, al no darse unas diferencias tan grandes en los viajes por persona y día dentro de un área dada como las que se pueden dar en los tiempos de recorrido, se pueden plantear también unos indicadores desagregados, que midan los cambios en la movilidad de cada persona estudiada y que, mediante una agregación posterior, permitan obtener la variación de la movilidad total.

Al igual que ocurría con en el caso de la accesibilidad, a partir de estos indicadores además de las variaciones medias de movilidad para los distintos tipos de usuarios, se puede obtener la varianza y la desviación típica para los diferentes tipos de usuarios.

Para cada usuario, se puede obtener como se ve modificada su movilidad:

$$\Delta m_i = \frac{n_p^i - n_o^i}{n_p^i} \quad (32)$$

siendo:

Δm_i : variación de la movilidad para el usuario i que cambia al SITOD

n_o^i : número de viajes diarios para un usuario en el escenario base o antes de la puesta en servicio del SITOD.

n_p^i : número de viajes diarios para un usuario después de la puesta en servicio del SITOD.

En este caso, la variación media de movilidad de los usuarios que cambian al SITOD será:

$$\Delta M^* = \frac{1}{U^*} \sum_{i=1}^{U^*} \Delta m_i \quad (33)$$

Igual que ocurría para la accesibilidad, se puede determinar la variación media de la movilidad para los usuarios del vehículo privado que cambian al SITOD:

$$\Delta M_{UVP} = \frac{1}{UVP^*} \sum_{i=1}^{UVP^*} \Delta m_i \quad (34)$$

También se puede determinar la variación media de la movilidad para los usuarios del transporte público que cambian al SITOD:

$$\Delta M_{UTP} = \frac{1}{UTP^*} \sum_{i=1}^{UTP^*} \Delta m_i \quad (35)$$

Si se pretende determinar la variación en la movilidad global (ΔM), definida igual que para la accesibilidad, se tiene:

$$\Delta M = \frac{1}{U} \sum_{i=1}^{U^*} \Delta m_i \quad (36)$$

Los usuarios que no cambian de modo de transporte ($U - U^*$) tendrán una variación de la movilidad nula ($\Delta m_i = 0$).

4.2.3.3.- Estudio del cambio modal.

4.2.3.3.1.- Práctica existente.

La elección de un modo de transporte por los usuarios responde a un elevado número de variables, que dependen de la oferta disponible como de las características de los usuarios y del motivo del viaje. Según el Manual para la Evaluación de Inversiones de Transporte en las Ciudades (MFOM, 1996), las características de un viaje en los distintos modos disponibles pueden expresarse en términos de “coste” o “desutilidad”, en función de las valoraciones que realice el usuario de las prestaciones de los distintos modos.

Existen diversas formulaciones de modelos de reparto modal, con diferentes niveles de desagregación. Los modelos más simples son los agregados, en los que se asume que el conjunto de la población residente es homogénea, y que el coste de viaje entre las zonas i y j en un modo determinado es constante.

Para cada viaje, la probabilidad de elección de uno de los modos se expresará como una relación entre sus costes respectivos, mediante una formulación de tipo LOGIT.

Una formulación más realista se obtiene mediante los “modelos desagregados” que están basados en las observaciones sobre los viajeros individuales en lugar de en comportamientos medios. El postulado fundamental de esta clase de modelos es que “la probabilidad de que un individuo elija una determinada opción es función de sus características socioeconómicas y de la atractividad relativa de la opción”. Esta atractividad se expresa en términos de utilidad, generalmente una combinación lineal de atributos de la alternativa.

Para ajustar estos modelos se pueden emplear datos de viajes observados (preferencias reveladas) o experimentos de situaciones hipotéticas (preferencias declaradas).

Estos modelos posibilitan el cálculo de la “elasticidad” de la demanda de cada uno de los modos de transporte cuando se modifican los componentes de la función de coste (tarifas, recorridos, tiempos de viajes, etc.)

En 1990, Giuliano et al. formularon un criterio para la evaluación de una vía de alta ocupación. Estas vías se implantan con el objetivo de producir un cambio modal desde el vehículo privado al vehículo compartido y al autobús. El aumento en el índice de ocupación de los vehículos en el corredor de una vía de alta ocupación o el cambio en el reparto modal, puede provenir bien de una redistribución de rutas, de una redistribución de tiempos, de un trasvase de usuarios del transporte público, de un trasvase de usuarios del vehículo privado con un solo ocupante o de varias de estas posibilidades a la vez.

Para saber si la vía de alta ocupación funciona es necesario eliminar todos estos efectos y cuantificar el cambio modal neto que se produce, entendiendo por cambio modal neto, la creación de nuevos usuarios del vehículo compartido procedentes de vehículo privado con un solo ocupante.

La cuantificación de este cambio modal neto se realiza a partir, tanto de los actuales usuarios del vehículo compartido como de los usuarios que lo utilizaban antes de la puesta en servicio de la vía de alta ocupación.

Los usuarios que utilizaban antes el vehículo compartido, pueden seguir usándolo (VC-VC) o pueden utilizar ahora el vehículo privado con un solo ocupante (VC-VS). De la misma manera, los actuales usuarios del vehículo compartido, pueden provenir de usuarios que ya utilizaban antes el vehículo compartido (VC-VC) o de usuarios que utilizaban antes el vehículo privado con un solo ocupante (VS-VC).

De esta forma, el cambio modal neto hacia el vehículo compartido viene dado por la fórmula:

$$CMNVC = ((VC-VC)+(VS-VC))-((VC-VC)+(VC-VS)) = (VS-VC)-(VC-VS) \quad (37)$$

y el cambio porcentual,

$$CMNVC = \frac{(VS - VC) - (VC - VS)}{(VC - VC) + (VS - VC) + (VC - VC) + (VC - VS)} \quad (38)$$

En 2000, González introduce un nuevo elemento en la vía de alta ocupación, el transporte público, y define el cambio modal neto hacia el vehículo compartido y hacia el transporte público.

Los usuarios que utilizaban antes el vehículo compartido, pueden seguir usándolo (VC-VC), pueden utilizar ahora el vehículo privado con un solo ocupante (VC-VS) o pueden utilizar ahora el transporte público (VC-TP). Los actuales usuarios del vehículo compartido pueden provenir de usuarios que ya lo utilizaban antes (VC-VC), de usuarios que utilizaban antes el vehículo privado con un solo ocupante (VS-VC) o de usuarios que utilizaban antes el transporte público (TP-VC).

Teniendo en cuenta que el cambio se considera positivo si se produce desde el vehículo con un solo ocupante hacia cualquiera de los otros dos modos, o desde el vehículo compartido hacia el transporte público, y negativo en caso contrario, se tiene que el cambio modal neto para el vehículo compartido es:

$$CMNVC = (VS-VC)-(TP-VC)-(VC-VS)-(VC-TP) \quad (39)$$

De la misma manera, los usuarios que utilizaban antes el transporte público, pueden seguir usándolo (TP-TP), pueden utilizar ahora el vehículo privado con un solo ocupante (TP-VS) o pueden utilizar ahora el vehículo compartido (TP-VC). Los actuales usuarios del transporte público pueden provenir de usuarios que ya lo utilizaban antes (TP-TP), de usuarios que utilizaban antes el vehículo privado con un solo ocupante (VS-TP) o de usuarios que utilizaban antes el vehículo compartido (VC-TP).

El cambio modal neto para el transporte público será:

$$CMNTP = ((VC-TP)+(VS-TP))-((TP-VC)+(TP-VS)) \quad (40)$$

El trabajo de González (2000) se utilizó para evaluar el carril BUS-VAO de la carretera N-VI de Madrid.

4.2.3.3.2.- Limitaciones.

Los modelos agregados presentan el problema de que se basan en comportamientos medios de los usuarios, se suponen poblaciones homogéneas y costes de viajes constantes.

Los modelos desagregados presentan el problema de la construcción y calibración de las funciones de utilidad para cada uno de los usuarios de los diferentes modos de transporte, en función de los atributos que se consideran representativos e independientes, lo que tiene una complejidad elevada.

4.2.3.3.3.- Propuesta de indicador.

La formulación del cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte (transporte público convencional + SITOD) se basa en la formulación realizada por Giuliano et al. (1990) y posteriormente modificada por González (2000), para la evaluación de vías de alta ocupación.

Se pueden dar dos escenarios posibles a la hora de implantar un Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda:

- Escenario 1.- Existe un sistema de transporte público alternativo al vehículo privado
- Escenario 2.- No existe ningún sistema de transporte público alternativo al vehículo privado

Siguiendo el mismo criterio que González (2000), se consideran cambios positivos aquellos que se producen hacia modos de mayor ocupación y negativos los que se producen hacia modos de menor ocupación. Es decir, si el usuario del vehículo privado

cambia hacia el transporte público convencional (en adelante, transporte público) o hacia el SITOD, se considera positivo. Si un usuario cambia del transporte público hacia el vehículo privado o hacia el SITOD, el cambio es negativo. En el caso de las personas que no realizan desplazamientos motorizados, el cambio hacia el SITOD siempre se considerará negativo, al implicar una mayor ocupación de las vías.

En este último caso, no se plantea la posibilidad de un cambio hacia el vehículo privado o hacia el transporte público debido a que esta no realización de desplazamientos motorizados se puede deber fundamentalmente a dos motivos: a la falta de medios para poder realizarlos, en cuyo caso el SITOD es la única nueva alternativa que se presenta; o a la no necesidad de este tipo de desplazamientos, que seguirán sin realizarse debido a que la implantación de este nuevo sistema no genera nuevas necesidades.

| ESCENARIO | ANTES | DESPUÉS | CAMBIO |
|--------------------|--------------------|--------------------|----------|
| Escenario 1 | Vehículo privado | SITOD | Positivo |
| | | Transporte público | Positivo |
| | | Vehículo privado | Neutro |
| | Transporte público | SITOD | Negativo |
| | | Transporte público | Neutro |
| | | Vehículo privado | Negativo |
| No desplazamientos | SITOD | Negativo | |
| Escenario 2 | Vehículo privado | SITOD | Positivo |
| | | Vehículo privado | Neutro |
| | No desplazamientos | SITOD | Negativo |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1.- Cambios modales entre modos

En el escenario 1, considérese la situación antes de la puesta en servicio del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda (usuarios que utilizaban el transporte público).

De la misma manera, considérese la situación después de la puesta en servicio del SITOD (usuarios que utilizan el transporte público y usuarios del SITOD).

Los usuarios que utilizaban antes el transporte público, pueden seguir usándolo (TP-TP), pueden utilizar ahora el vehículo privado (TP-VP) o pueden utilizar ahora el SITOD (TP-TD).

De la misma manera, los actuales usuarios del transporte público, pueden provenir de usuarios que ya utilizaban antes el transporte público (TP-TP) o de usuarios que utilizaban antes el vehículo privado (VP-TP).

Los actuales usuarios del SITOD pueden provenir de usuarios que antes utilizaban el transporte público (TP-TD), de usuarios que utilizaban el vehículo privado (VP-TD) o de personas que no realizaban desplazamientos (ND-TD).

La formulación del cambio modal neto para el transporte público, teniendo en cuenta el sentido de los cambios expuesto en la tabla 4.1, es la siguiente:

$$CMNTP = (VP-TP)-((TP-VP)+(TP-TD)) \quad (41)$$

y en porcentaje con respecto al total de usuarios posibles,

$$CMNTP = \frac{(VP - TP) - ((TP - VP) + (TP - TD))}{(VP - VP) + (VP - TP) + (VP - TD) + (TP - TP) + (TP - VP) + (TP - TD)} \quad (42)$$

De la misma manera, la formulación del cambio modal neto para el Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda es la siguiente:

$$CMNTD = (VP-TD)-((TP-TD)+(ND-TD)) \quad (43)$$

y en porcentaje con respecto al total de usuarios posibles,

$$CMNTD = \frac{(VP - TD) - ((TP - TD) + (ND - TD))}{(VP - VP) + (VP - TP) + (VP - TD) + (TP - TP) + (TP - VP) + (TP - TD) + (ND - TD)} \quad (44)$$

La formulación del cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte (transporte público convencional + SITOD), a partir de las formulaciones anteriores, y en este caso sin considerar el cambio modal que se pueda producir entre el transporte público convencional y el SITOD, es la siguiente:

$$CMNMP = ((VP-TP)+(VP-TD))-((TP-VP)+(ND-TD)) \quad (45)$$

y en porcentaje con respecto al total de los usuarios posibles,

$$CMNMP = \frac{((VP - TP) + (VP - TD)) - ((TP - VP) + (ND - TD))}{(VP - VP) + (VP - TP) + (VP - TD) + (TP - TP) + (TP - VP) + (TP - TD) + (ND - TD)} \quad (46)$$

En el escenario 2, considérese la situación antes de la puesta en servicio del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda (no existía transporte público).

De la misma manera, considérese la situación después de la puesta en servicio del SITOD (solo existen usuarios del SITOD).

Los actuales usuarios del SITOD pueden provenir de usuarios que antes utilizaban el vehículo privado (VP-TD) o de personas que no realizaban desplazamientos (ND-TD).

En este escenario el cambio modal neto hacia el SITOD, que es el único que se puede plantear, es el siguiente:

$$CMNTD = (VP-TD)-(ND-TD) \quad (47)$$

y en porcentaje con respecto al total de usuarios posibles,

$$CMNTD = \frac{(VP - TD) - (ND - TD)}{(VP - VP) + (VP - TD) + (ND - TD)} \quad (48)$$

En este caso, al no existir transporte público alternativo al vehículo privado, la formulación del cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte es la misma que la del cambio modal neto hacia el SITOD, dada por las ecuaciones (47) y (48). Por tanto se tiene que:

$$CMNMP = (VP-TD)-(ND-TD) \quad (49)$$

y en porcentaje con respecto al total de usuarios posibles,

$$CMNMP = \frac{(VP - TD) - (ND - TD)}{(VP - VP) + (VP - TD) + (ND - TD)} \quad (50)$$

4.2.3.4.- Estudio del beneficio.

Dentro de los grupos de población que se beneficiarían del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda (usuarios, proveedores, administraciones, etc.) se pueden distinguir dos grandes grupos:

- de forma directa, los usuarios e,
- indirectamente, la sociedad en general.

4.2.3.4.1.- Usuarios.

Los beneficios económicos que obtienen los usuarios del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda son los únicos que se van a considerar en este apartado.

Los beneficios relativos al aumento de la accesibilidad, de la movilidad, de la disminución de los tiempos de recorrido, que también podrían ser objeto de una valoración económica, ya están incluidos en los indicadores anteriores, e incluirlo llevaría a darles un mayor peso en la evaluación multicriterio.

Existen otros beneficios de difícil valoración cuantitativa y que sólo son susceptibles de ser valorados de forma cualitativa: disminución del estrés provocado por la conducción, comodidad, fiabilidad, puntualidad, etc.

El coste del viaje para un usuario del transporte público convencional o del SITOD lo constituye la tarifa que tiene que pagar por cada servicio. El coste del viaje para un usuario del vehículo privado está compuesto por el coste de aparcamiento y el coste de funcionamiento. En esta tesis se adopta como formulación del coste de funcionamiento la aprobada por el Ministerio de Fomento, en el Manual para la Evaluación de Inversiones de Transporte en las Ciudades (MFOM, 1996), y cuyos componentes son los siguientes: coste de amortización del vehículo, costes de mantenimiento y reparaciones (o de conservación), los costes derivados del consumo de combustibles, los

debidos al consumo de lubricantes y los debidos al desgaste y reparación de las cámaras y cubiertas de los neumáticos.

$$C^{UTP} = \text{tarifa del transporte público} \quad (51)$$

$$C^{SITOD} = \text{tarifa del SITOD} \quad (52)$$

$$C^{UVP} = C^a + C^f \quad (53)$$

$$C^f = (C_{Am} + C_{PK} + C_M + C_L + C_P) \times Km \quad (54)$$

donde:

C^{UTP} : coste del viaje para un usuario del transporte público convencional

C^{SITOD} : coste del viaje para un usuario del SITOD

C^{UVP} : coste del viaje para un usuario del vehículo privado

C^a : coste de aparcamiento del vehículo privado

C^f : coste de funcionamiento del vehículo privado

C_{Am} : costes de amortización por kilómetro del vehículo privado

C_{PK} : costes de conservación o de mantenimiento y reparación por kilómetro del vehículo privado

C_M : costes de consumo de combustible por kilómetro del vehículo privado

C_L : costes de consumo de lubricantes por kilómetro del vehículo privado

C_P : costes debido al desgaste y reparación de neumáticos por kilómetro del vehículo privado

Km : kilómetros recorridos por viaje en el vehículo privado

Los costes de amortización unitarios (por kilómetro) (CAm) dependen del precio franco de fábrica del vehículo, del valor residual del mismo al final de su vida útil, de su vida útil y del recorrido medio anual del vehículo, según la siguiente formulación:

$$CAm = \frac{PFF - VR}{VU \times RMA} \quad (55)$$

donde PFF es el precio franco de fábrica del vehículo, VR es el valor residual al final de la vida útil, VU son los años de vida útil del vehículo y RMA es el recorrido medio anual del vehículo.

Los costes de conservación (CPK) dependen de la clase de vehículo (ligero o pesado) y de la velocidad media de recorrido. Para un vehículo ligero, la expresión funcional que cuantifica los costes de conservación es la siguiente:

$$CPK = 17,22 \cdot V^{-0,44} \quad (56)$$

donde V es la velocidad media de recorrido del vehículo en km./h y CPK se expresa en Ptas./km.

Los costes derivados del consumo de combustible por kilómetro (CM) dependen, al igual que los costes de conservación, de la clase de vehículo, del carácter urbano o interurbano de la vía, de la pendiente de la misma y de la velocidad media de recorrido. Para un vehículo ligero se tiene:

En tramos interurbanos en rampa o en llano:

$$CM = (117,58 - 1,76 \cdot V + 0,0121 \cdot V^2 + 24,09 \cdot p - 0,47 \cdot V \cdot p + 0,00474 \cdot V^2 \cdot p) \times P \quad (57)$$

En tramos interurbanos en pendiente:

$$CM = (92,76 - 1,3 \cdot V + 0,01 \cdot V^2 - 6,77 \cdot p + 0,33 \cdot V \cdot p - 0,00245 \cdot V^2 \cdot p) \times P \quad (58)$$

En tramos urbanos:

$$CM = \left(7 + \frac{99}{V} \right) \times P \quad (59)$$

donde V es la velocidad media de recorrido del vehículo en km./h, p es la inclinación en % (se considera positiva en rampa y negativa en pendiente), P es el precio por litro del combustible.

Los costes de lubricantes por kilómetro (CL) dependen del consumo de combustible y del precio del lubricante, siendo su expresión funcional la siguiente:

$$CL = 0,012 \times \frac{CM}{P} \times PA \quad (60)$$

siendo PA el precio por litro del lubricante, CM los costes de combustible por kilómetro y P el precio por litro del combustible.

Por último, el coste debido al desgaste de los neumáticos por kilómetro (CP) depende de la clase de vehículo, del precio de cada neumático y del recorrido medio entre cambio de neumáticos. La expresión funcional es la siguiente:

$$CP = \frac{\alpha \cdot PN}{R_c} \quad (61)$$

donde α tiene un valor 4 para vehículos ligeros y de 6 para vehículos pesados, PN es el precio de cada neumático y R_c es el recorrido medio entre cambio de neumáticos. Esta última variable (R_c) depende de las características del tráfico (velocidad máxima y nivel de servicio) y del tipo de vía y del terreno (recta y llano, recta y ondulado, curvas y accidentado, y muchas curvas y muy accidentado).

Las personas que con anterioridad a la implantación del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda no realizaban desplazamientos, no son susceptibles de obtener un beneficio económico y, por tanto, no se consideran en la determinación del beneficio total para los usuarios del SITOD.

Para los UVP y los UTP se plantea un indicador en función de los costes del viaje antes (o en el escenario base) y después (una vez puesto en funcionamiento el sistema)

utilizando SITOD. La variación de los costes del viaje para cada usuario será la siguiente:

$$\Delta C_i^{UVP} = \frac{C_i^{UVP} - C_i^{SITOD}}{C_i^{UVP}} \quad (62)$$

$$\Delta C_i^{UTP} = \frac{C_i^{UTP} - C_i^{SITOD}}{C_i^{UTP}} \quad (63)$$

siendo:

ΔC_i^{UVP} : variación del coste del viaje para el usuario i que antes utilizaba el vehículo privado

ΔC_i^{UTP} : variación del coste del viaje para el usuario i que antes utilizaba el transporte público

C_i^{UVP} : coste del viaje para un usuario i que en el escenario base utilizaba el vehículo privado.

C_i^{UTP} : coste del viaje para un usuario i que en el escenario base utilizaba el transporte público.

C_i^{SITOD} : coste del viaje para un usuario i que utiliza el SITOD después de la puesta en servicio del sistema.

Se puede determinar la variación media del coste del viaje para los usuarios del vehículo privado que cambian al SITOD (ΔC_{UVP}):

$$\Delta C_{UVP} = \frac{1}{UVP^*} \sum_{i=1}^{UVP^*} \Delta C_i^{UVP} \quad (64)$$

De igual modo, se puede determinar la variación media del coste del viaje para los usuarios del transporte público que cambian al SITOD (ΔC_{UTP}):

$$\Delta C_{UTP} = \frac{1}{UTP^*} \sum_{i=1}^{UTP^*} \Delta C_i^{UTP} \quad (65)$$

El beneficio económico medio para los usuarios que cambian del vehículo privado o del transporte público al SITOD (ΔB^*) será:

$$\Delta B^* = \frac{UVP^* \cdot \Delta C_{UVP} + UTP^* \cdot \Delta C_{UTP}}{UVP^* + UTP^*} \quad (66)$$

4.2.3.4.2.- Sociedad.

No todos los costes que se producen en el campo del transporte son directamente soportados por los usuarios o por los prestatarios del servicio (Izquierdo et al., 1994), sino que el mismo produce unos efectos externos o externalidades que repercuten sobre el conjunto de la sociedad.

En la literatura actual, más difundida en el campo del transporte, se suelen incluir las siguientes externalidades: congestión, accidentes, tiempo, ruido, contaminación atmosférica y, contaminación de las aguas.

El transporte constituye una de las fuentes más importantes del deterioro del medio ambiente (Inglada, 2000). Los costes externos de los impactos ambientales del transporte son enormes. Se estima que la contaminación atmosférica y el ruido cuestan en la Unión Europea unos 40 billones de ECUs al año (OECD-ECMT, 1995), de los cuales más del 90% son debidos al transporte por carretera.

Es por esta razón que los únicos efectos sobre la sociedad, producidos por la implantación de un Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda, que se van a considerar en la presente tesis doctoral son los relativos a la contaminación acústica o ruido y a la contaminación atmosférica.

Las otras externalidades, para este tipo de sistema de transporte, tienen una menor importancia (contaminación de las aguas), son muy difíciles de cuantificar (accidentes),o ya se han incluido en otros indicadores (congestión).

Contaminación atmosférica

En todo el mundo, las emisiones de los vehículos son las fuentes de contaminación atmosférica predominantes en los centros de las ciudades (Sharma & Khare, 2001). Esto se debe a que los vehículos circulan en unas condiciones de circulación muy precarias (continuos acelerones y frenazos), a causa de las múltiples intersecciones existentes y a la congestión, que provocan que se genere una mayor cantidad de polución que la que se produciría en unas condiciones de circulación estables.

Los contaminantes más habituales en las grandes ciudades, asociados al transporte, son: el SO₂, procedente de la combustión de aceites y de carbón; el CO, procedente de la combustión incompleta de hidrocarburos; los hidrocarburos, procedentes de la combustión de los mismos; el NO₂, procedente de la combustión de combustibles fósiles; el plomo, procedente de la combustión de la gasolina; y las partículas en suspensión, cuyas fuentes de emisión son variables.

En la presente tesis se adopta como indicador de la variación de la contaminación atmosférica el siguiente:

$$\Delta CA = \frac{CA^R - CA^{SITOD}}{CA^R} \quad (67)$$

siendo:

CA^R: contaminación atmosférica en el escenario de referencia

CA^{SITOD}: contaminación atmosférica después de la puesta en servicio del SITOD

En ambos casos, la estimación de la contaminación atmosférica (CA) se basa en el método de cálculo del Manual para la Evaluación de Inversiones de Transporte en las Ciudades (MFOM, 1996), que considera como principales contaminantes el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, y los compuestos orgánicos volátiles

(hidrocarburos). Según dicho manual, la emisión de cada uno de esos contaminantes debido al tráfico se calcula mediante la expresión siguiente:

$$E^k = L \times \text{IMD} \times (pe \cdot k_p + (100 - pe) \cdot k_l) \quad (68)$$

donde:

- E^k : emisión del contaminante (CO, NO_x y COV)
- L: distancia recorrida en kilómetros
- IMD: intensidad media diaria
- pe: porcentaje de pesados
- k_p : Tasa de emisión del contaminante (en gr./km.) para vehículos pesados
- k_l : Tasa de emisión del contaminante (en gr./km.) para vehículos ligeros

La expresión anterior indica que la emisión de contaminantes es proporcional a los kilómetros recorridos ($L \times \text{IMD}$). La expresión que se propone para la determinación de la emisión de contaminantes en la presente tesis es la siguiente:

$$E^k = K_m \times k_l \quad (69)$$

donde:

- K_m : kilómetros recorridos (en el escenario de referencia o después de la puesta en servicio del SITOD)

El Manual para la Evaluación de Inversiones de Transporte en las Ciudades (MFOM, 1996) utiliza un indicador para la variación de cada uno de ellos. Con el objeto de obtener un indicador global para la variación de la contaminación atmosférica, como el anteriormente definido, se utiliza el índice agregado de polución atmosférica definido en el proyecto europeo TRANSPRICE (1999), modificado para tener en cuenta los tres tipos de contaminantes considerados (CO, NO_x y COV). Este índice pondera los tres

contaminantes en función de un factor de toxicidad. La formulación propuesta sería la siguiente:

$$CA = CO + 125 \cdot NO_x + 100 \cdot COV \quad (70)$$

donde:

CO: emisión de monóxido de carbono

NO_x: emisión de óxidos de nitrógeno

COV: emisión de compuestos orgánicos volátiles

Ruido o contaminación acústica

Según el Manual para la Evaluación de Inversiones de Transporte en las Ciudades (MFOM, 1996), el ruido producido en una vía de tráfico existente se puede estimar conociendo las características mecánicas de los vehículos, la intensidad del tráfico, la velocidad de los vehículos, la proporción de pesados, el tipo de superficie de la calzada y la pendiente de la misma.

El ruido recibido en un punto determinado depende, además del ruido generado, de otros factores como la distancia emisor receptor, la diferencia media de altura entre el emisor y el receptor, la reflexión, y la interceptación por pantallas.

Dada la inexistencia de una normativa legal española que especifique el método de cálculo del ruido generado y percibido, el Manual para la Evaluación de Inversiones de Transporte en las Ciudades (MFOM, 1996) recomienda la utilización de la norma alemana RSL-90, y desarrolla un procedimiento simplificado basado en dicha norma.

Este método calcula el nivel sonoro equivalente (L_{eq}) en un punto determinado de la sección transversal de la vía de acuerdo con la composición y parámetros del tráfico y las características geométricas de la vía.

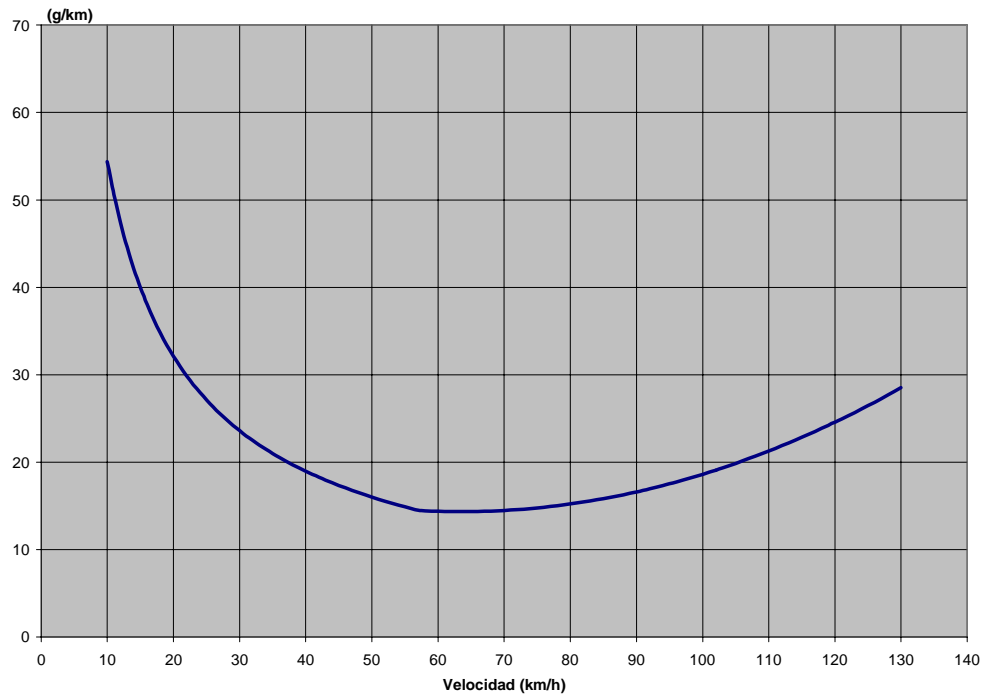


Gráfico 4.1.- Factores de emisión de CO para turismos de gasolina.

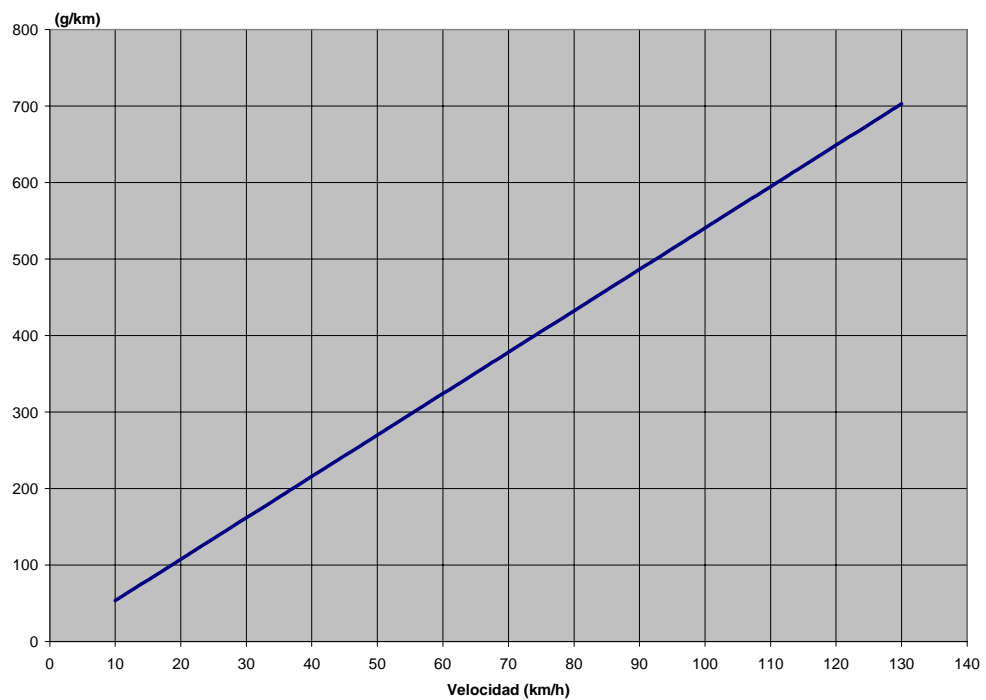


Gráfico 4.2.- Factores de emisión de CO para turismos de gasoil.

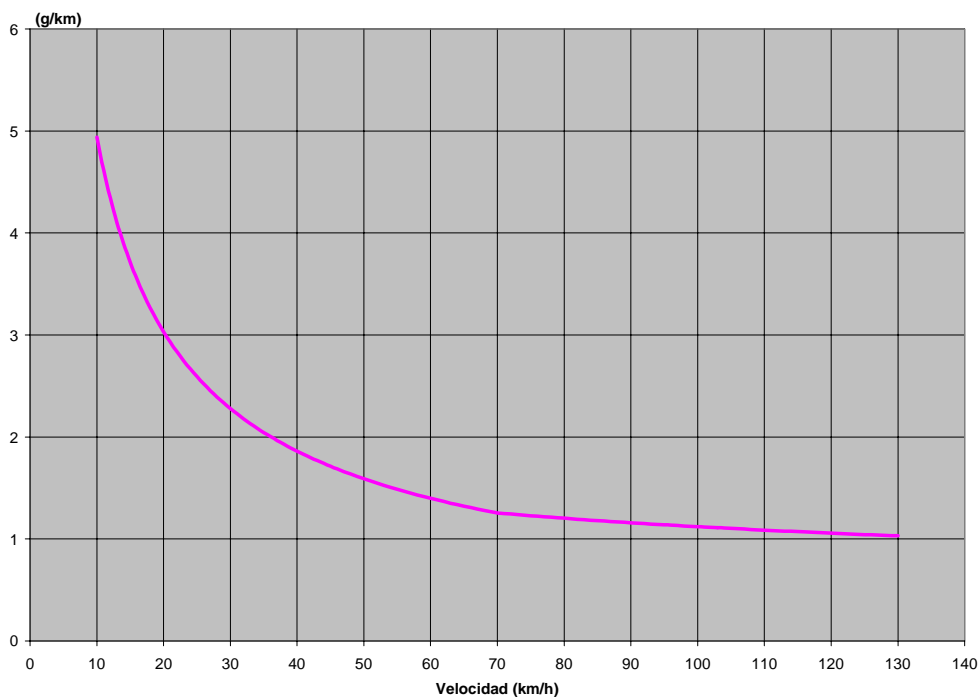


Gráfico 4.3.- Factores de emisión de COV para turismos de gasolina.

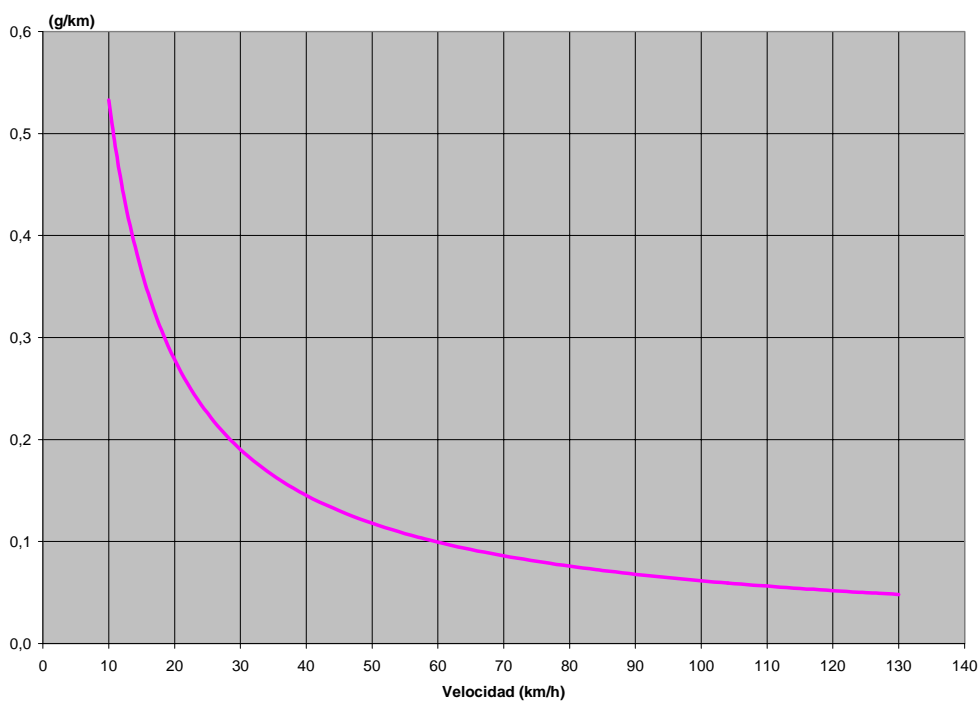


Gráfico 4.4.- Factores de emisión de COV para turismos de gasoil.

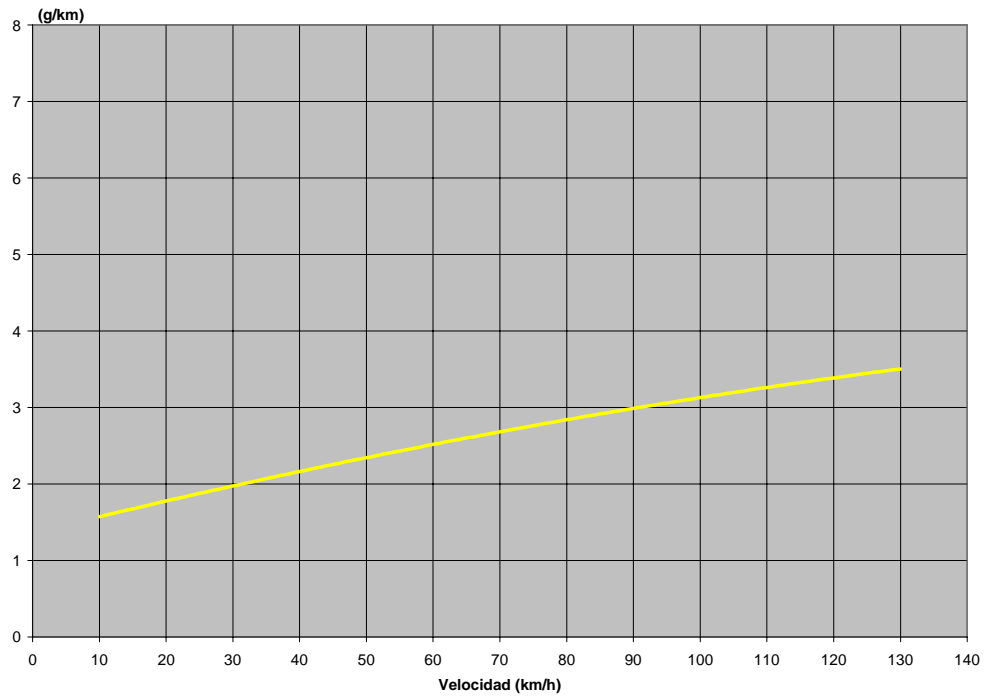


Gráfico 4.5.- Factores de emisión de NO_x para turismos de gasolina.

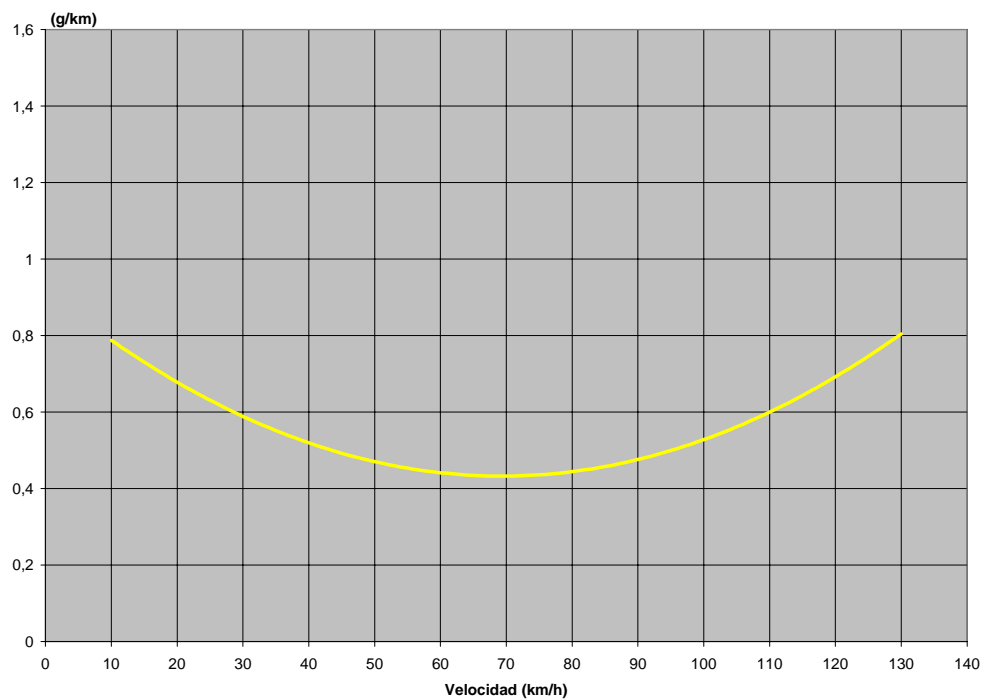


Gráfico 4.6.- Factores de emisión de NO_x para turismos de gasoil.

El valor de L_{eq} se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_{eq} = L_m^{(25)} + D_v + D_s + D_{refl} \quad (71)$$

donde:

$L_m^{(25)}$: nivel sonoro equivalente a 25 metros de la fuente sonora y a velocidad de 100 km./hora

D_v : Corrección por velocidad

D_s : Corrección por distancia

D_{refl} : Corrección por reflexión

Para el calculo de estas variables es necesario conocer la intensidad media horaria, el porcentaje de vehículos pesados, la velocidad media en km./h de los vehículos ligeros y la de los vehículos pesados, la distancia entre el punto emisor y el receptor, la diferencia de altura entre el emisor y el receptor, la altura media de la edificación, y la distancia horizontal entre fachadas.

La necesidad de conocer tal cantidad de datos hacen que la aplicación de este método, en una determinada zona geográfica, en la que no se mantienen constantes los mismos, sea poco viable. Este método es adecuado para el análisis de los niveles sonoros en zonas puntuales.

En la presente tesis doctoral se utilizará como indicador de las mejoras en la contaminación acústica la fórmula austríaca utilizada en el proyecto TRANSPRICE (1999), que solo necesita conocer los kilómetros recorridos por los vehículos en el escenario de referencia y después de la puesta en servicio del SITOD:

$$\Delta R = 37,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{Km^R}{Km^{SITOD}} \right) \quad (72)$$

donde:

ΔR : porcentaje de personas que son menos (+) o más (-) afectadas por el ruido después de la puesta en servicio del SITOD

Km^R : kilómetros recorridos en el escenario de referencia

Km^{SITOD} : kilómetros recorridos después de la puesta en servicio del SITOD

4.2.4.- Evaluación multicriterio y medidas de gestión.

4.2.4.1.- Evaluación multicriterio desagregada.

La aplicación de las tres fases anteriores (recogida de datos, análisis de los mismos y construcción de indicadores específicos) permite la obtención de los siguientes resultados:

- Análisis y caracterización del Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda en el área objeto de estudio (recogida de datos por medio de entrevistas o encuestas específicas y análisis de los mismos)
- Cuantificación de los cambios producidos en la accesibilidad dentro del área objeto de estudio mediante un **Indicador de Accesibilidad** construido ad hoc para el Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda (recogida de datos por medio de entrevistas o encuestas específicas y construcción de indicadores)
- Cuantificación de los cambios producidos en la movilidad dentro del área objeto de estudio mediante un **Indicador de Movilidad** construido también ad hoc (recogida de datos por medio de entrevistas o encuestas específicas y construcción de indicadores)
- Cuantificación del cambio modal producido en el área objeto de estudio mediante un **Indicador del Cambio Modal** que tiene en cuenta el cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte (el transporte público

convencional y el SITOD) (recogida de datos por medio de entrevistas o encuestas y construcción de indicadores)

- Evaluación del beneficio que obtienen los usuarios del servicio y la sociedad en general mediante tres **Indicadores específicos del beneficio** (recogida de datos y construcción de indicadores). Uno que tiene en cuenta el beneficio económico para los usuarios del servicio debido a la variación en los costes del transporte y otros dos que cuantifican los beneficios para la sociedad en general debido a las modificaciones medioambientales (ruido y contaminación atmosférica) que se producen en el área objeto de estudio

La actual política de la Unión Europea en materia de transporte supone la gestión de una movilidad sostenible, definida como aquella que permite al transporte cumplir su papel económico y social a la vez que limita sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Dentro de estas líneas generales es preciso que los objetivos se adapten a las peculiaridades y necesidades de cada zona en concreto.

Los objetivos serán diferentes en función de las características de la zona donde se aplique y el grupo de población al que vaya dirigido:

- En zonas con un servicio público convencional deficiente los objetivos serían los siguientes:
 - Aumentar el número de desplazamientos en transporte público y reducir los realizados en vehículo privado
 - Aumentar las frecuencias y franjas horarias del servicio de transporte público
 - Rentabilizar las líneas de transporte público con bajos índices de ocupación

- Aumentar la movilidad y la accesibilidad de la población de la zona para disminuir su aislamiento social y estancamiento económico
- En áreas metropolitanas en expansión con problemas de congestión en el núcleo central los objetivos serían los siguientes:
 - Disminuir el uso del vehículo privado y aumentar el del transporte público
 - Disminuir las intensidades de circulación y la congestión en el centro de las ciudades
 - Disminuir la contaminación atmosférica, acústica y visual producida por los vehículos privados y mejorar la calidad de vida en las ciudades
 - Reducir las pérdidas económicas debidas a los elevados costes para los propietarios de los vehículos (incremento del consumo de combustible,...), para las ciudades (al perder ciertos servicios el atractivo por la dificultad de accesibilidad a los mismos) y para la sociedad al aumentar el índice de accidentalidad
 - Disminuir la pérdida de rentabilidad del desplazamiento en transporte público al ser entorpecido en sus trayectorias y ver incrementadas sus demoras
- Para grupos de población con movilidad reducida el objetivo principal sería el siguiente:
 - Aumentar la movilidad y la accesibilidad de estos grupos para disminuir su aislamiento social y aumentar su calidad de vida

La Administración responsable debe disponer, primero, de las herramientas adecuadas para la evaluación del cumplimiento de estos objetivos, y segundo, de las medidas adecuadas que permitan una correcta gestión de los recursos que posee, siempre limitados, en aras de poder cumplir dichos objetivos.

El objeto de la cuarta fase de la metodología propuesta es proporcionar a la Administración responsable de unos criterios de valoración del grado de consecución de dichos objetivos de una forma precisa, y proponer las medidas necesarias para la correcta gestión de los recursos en función del grado de cumplimiento de dichos objetivos.

Para identificar el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos se utilizan los indicadores construidos en la fase anterior.

| | INDICADOR | VALOR |
|---------------|--|----------|
| ACCESIBILIDAD | Variación de la accesibilidad global (ΔA) | Positivo |
| | | Negativo |
| MOVILIDAD | Variación en la movilidad global (ΔM) | Positivo |
| | | Negativo |
| CAMBIO MODAL | Cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte (CMNMP) | Positivo |
| | | Negativo |
| BENEFICIO | Beneficio económico medio para los usuarios del SITOD (ΔB^*) | Positivo |
| | | Negativo |
| | Variación de la contaminación atmosférica (ΔCA) | Positivo |
| | | Negativo |
| | Variación del impacto por ruido (ΔR) | Positivo |
| | | Negativo |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2.- Indicadores para la evaluación

En función de los valores que tomen los indicadores anteriores, el método de evaluación que se propone, contempla el empleo de una o varias medidas que la Administración

responsable dispone para hacer frente a la adecuada gestión de la movilidad en el área objeto de estudio.

Los valores que pueden adoptar los indicadores son los que se reflejan en la tabla 4.2.

4.2.4.2.- Indicador global de evaluación.

Resulta interesante observar como en las fases precedentes de la metodología de evaluación del SITOD se requiere una información exclusivamente de tipo técnico. Es decir, sólo se necesita información no preferencial.

Sin embargo, para establecer un indicador global de evaluación es necesario introducir una cierta subjetividad en la metodología de evaluación. Las preferencias reales del centro decisor o de la sociedad en general aparecen cuando se establecen las funciones de utilidad de cada uno de los criterios o indicadores de evaluación utilizados.

Las funciones de utilidad de cada criterio o indicador son funciones reales cuyo único propósito es transformar los criterios para medirlos en la misma escala y ponderarlos, evitando problemas de unidades y asegurando que el sumatorio es consistente (MFOM, 1996).

Aunque no siempre es necesario, en muchos métodos multicriterio resulta esencial proceder a la normalización de los diferentes índices o criterios en consideración (Romero, 1996).

Es frecuente la utilización de escalas de rango $[0,1]$ para la normalización de valores de los criterios (MFOM, 1996). Sin embargo, siguiendo el mismo criterio que se ha venido usando hasta ahora, se propone utilizar una escala $[-1,1]$ para la normalización de los diferentes indicadores, que permite una mayor significación física, como se señala a continuación.

Para un criterio determinado, el indicador utilizado puede traducir una mejora respecto a la situación de referencia y estará en la parte positiva de la escala $[0,1]$, o un

empeoramiento respecto de la situación de referencia y estará en la parte negativa de la escala [-1,0].

La utilización de una escala normalizada implica, entonces:

- El valor 0 corresponde a la falta de variabilidad de un atributo respecto a la situación de referencia.
- Valores positivos de la utilidad de una alternativa significan su preferencia respecto a la situación de referencia, en tanto que valores negativos de la utilidad significan un empeoramiento con respecto a dicha situación.

Los criterios o índices relevantes en una evaluación multicriterio pueden tener diferente importancia para el decisor o para la sociedad en general. Este hecho hace que, para establecer un indicador global de evaluación, resulte necesario establecer unos pesos que tengan en cuenta las preferencias relativas del centro decisor por unos criterios con respecto a otros. Conviene indicar que la estimación de las preferencias relativas conlleva una fuerte carga subjetiva lo que hace necesario que para estimar dichos pesos preferenciales se tenga que interaccionar de una manera u otra con el centro decisor o con la sociedad.

4.2.4.2.1.- Normalización de los indicadores.

Aunque las unidades en las que están medidos los diferentes criterios son las mismas (los siete indicadores son adimensionales), la normalización de los diferentes criterios en consideración es necesaria por los dos tipos de razones que se exponen seguidamente (Romero, 1996).

En primer lugar debe tenerse en cuenta que los valores teóricos alcanzables por los diferentes criterios son muy diferentes (véase tabla 4.3). Sin una normalización previa de los indicadores, un indicador de evaluación global puede quedar sesgado y conducir a dar una mayor importancia a los que alcanzan valores mayores.

Y en segundo lugar, cuando en el epígrafe 4.2.4.2.2 se analicen los procedimientos para interaccionar con el centro decisor con el propósito de obtener unos pesos que indiquen sus preferencias, la normalización previa de los criterios facilita este tipo de tarea.

Algunos de los procedimientos de normalización más utilizados en la práctica son los siguientes (Romero, 1996):

- Uno de los métodos más simples consiste en dividir los valores que alcanza el criterio por su valor “mejor”. El valor mejor es el máximo cuando el criterio consiste en una atributo del tipo “más mejor” o el mínimo cuando se trata de un atributo del tipo “menos mejor”.
- También pueden normalizarse los criterios, dividiendo los valores que alcanza el criterio por su recorrido. Se entiende por recorrido la diferencia entre el valor “mejor” y el valor “peor” alcanzado por cada criterio.
- En algunos casos resulta conveniente que los valores normalizados de los criterios queden acotados en el intervalo $[0,1]$. Este tipo de normalización puede conseguirse restando al “mejor” valor el que realmente alcanza el criterio, dividiendo seguidamente dicha diferencia por el correspondiente rango.

Un método también muy utilizado (MFOM, 1996) es el de las funciones de utilidad que, como ya se ha indicado, permiten transformar los indicadores para medirlos en la misma escala. Se va a utilizar una escala $[-1,1]$ que permite una mayor significación física, como se indicó con anterioridad.

Existen diferentes tipos de funciones de utilidad (lineales, bilineales, no lineales con pendiente creciente, no lineales con pendiente decreciente, discontinuas en escalón, etc.) que pueden utilizarse según las características del criterio que se quiera normalizar.

Un aspecto importante, común a todas las funciones de utilidad, es la definición de un umbral máximo, al que se asocia la máxima utilidad posible (la unidad), y de un umbral

mínimo, al que se asocia la mínima utilidad posible. En principio, podría pensarse en utilizar, como umbrales de un indicador, los valores máximos y mínimos teóricos que puede alcanzar dicho indicador.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el establecimiento de unos umbrales excesivamente elevados para un indicador dado tiene como consecuencia una reducción indirecta del peso de dicho criterio en la utilidad total, por cuanto será difícil que se alcancen valores próximos a uno para dicho indicador.

| INDICADOR | | MAXIMO TEORICO | MINIMO TEORICO |
|--|-------------|-------------------------------------|--|
| Variación de la accesibilidad global | | 1 | - ∞ |
| Variación en la movilidad global | | 1 | - ∞ |
| Cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte (transporte público convencional + SITOD) | Escenario 1 | $\frac{VP}{VP + TP}$ | $-\frac{TP + ND}{VP + TP + ND}$ |
| | Escenario 2 | $\frac{VP}{VP} = 1$ | $-\frac{ND}{VP + ND}$ |
| Beneficio económico medio para los usuarios del SITOD | | Cuando la tarifa del SITOD sea nula | Cuando la tarifa del SITOD sea igual al coste de un taxi |
| Variación de la contaminación atmosférica | | 1 | - ∞ |
| Variación del impacto por ruido | | 100% | -100% |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3.- Valores máximos y mínimos teóricos de los indicadores.

Por ello, se propone, basándose en los valores máximos y mínimos teóricos que pueden alcanzar los diferentes indicadores, utilizar unos umbrales máximos y mínimos “razonables” para cada uno de ellos. Se establecerán umbrales distintos dependiendo del ámbito de aplicación (área metropolitana o ámbito rural).

A continuación se describe la función de utilidad propuesta para la normalización de cada uno de los siete indicadores, así como los valores teóricos máximos y mínimos que pueden alcanzar cada uno de ellos, que servirán de punto de partida para definir los umbrales máximos a los que se les asociará la máxima utilidad.

Variación de la accesibilidad global

Se propone usar una función de utilidad no lineal con pendiente creciente, ya que pequeñas variaciones de accesibilidad tendrán poco efecto sobre el sistema territorial. Pequeñas variaciones de tiempo de viaje pueden ser de poca utilidad, mientras que variaciones significativas pueden ser de una utilidad más que proporcional.

Matemáticamente, en el límite, los valores máximos y mínimo que puede tomar este indicador son 1 y $-\infty$. Tomará el valor 1 cuando el tiempo de viaje después de la puesta en servicio de este sistema sea nulo, y el valor $-\infty$ cuando el tiempo de viaje después de la puesta en servicio del sistema sea infinito.

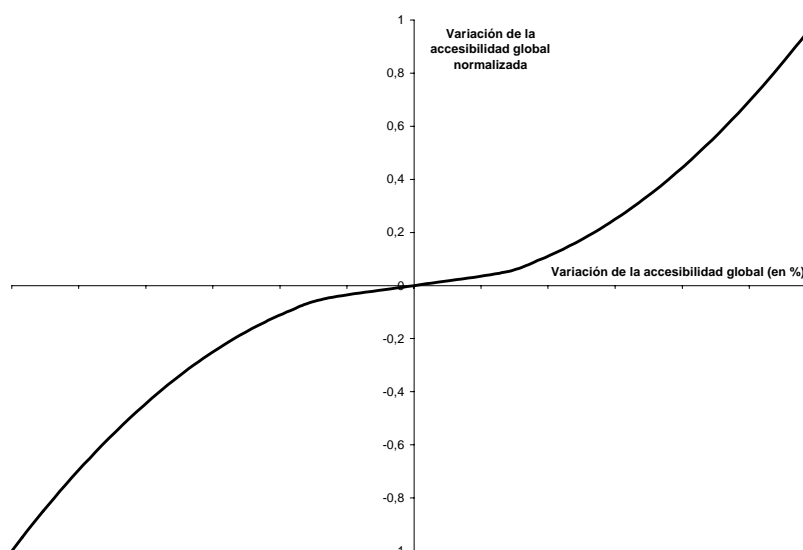


Gráfico 4.7.- Función de utilidad para la variación de la accesibilidad global.

Respecto a los umbrales máximos, será preciso diferenciar entre áreas rurales, zonas de nuevo desarrollo urbano y aquellas zonas de centralidad en áreas urbanas consolidadas.

Variación en la movilidad global

En este caso, se propone utilizar una función de utilidad no lineal con pendiente decreciente, ya que pequeños cambios pueden ser percibidos como muy significativos,

mientras que los cambios más allá de un cierto nivel pueden tener una utilidad marginal poco relevante.

Los valores máximos y mínimo que pueden tomar este indicador son 1 y $-\infty$. Tomará el valor 1 cuando el número medio de viajes motorizados por persona y día en el escenario base sea nulo, y el valor $-\infty$ cuando el número medio de viajes motorizados por persona y día después de la puesta en servicio del sistema sea cero.

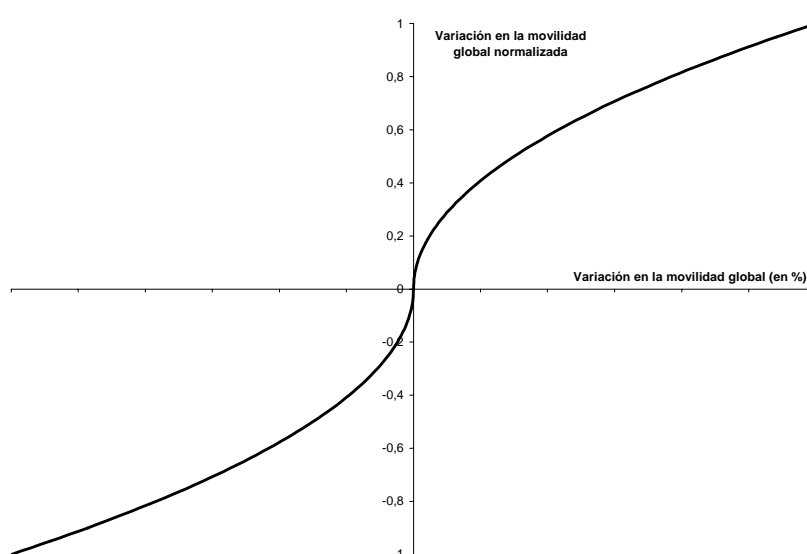


Gráfico 4.8.- Función de utilidad para la variación en la movilidad global.

Cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte

Se propone usar una función de utilidad no lineal con pendiente creciente, ya que pequeños cambios modales hacia los modos públicos de transporte tendrán poca repercusión sobre el sistema viario, mientras que cambios modales más allá de un cierto umbral pueden ser de una utilidad más que proporcional.

Para determinar los valores teóricos máximos y mínimos que puede tomar este indicador es necesario distinguir entre los dos posibles escenarios que se pueden presentar, el escenario 1, donde existe un servicio de transporte público alternativo al

vehículo privado antes de la puesta en funcionamiento del SITOD, y el escenario 2, donde no existe tal servicio.

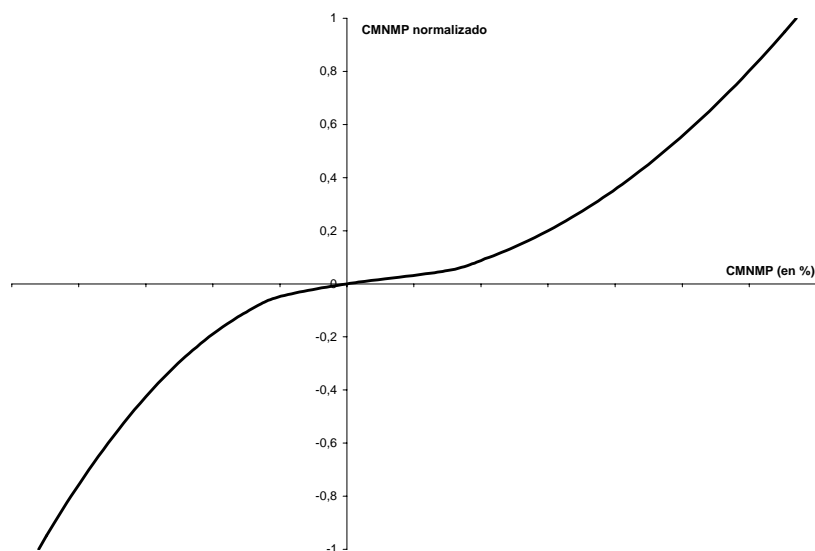


Gráfico 4.9.- Función de utilidad para el cambio modal neto hacia los modos públicos.

En el escenario 1, el valor máximo teórico que puede tomar este indicador se alcanza cuando todos los usuarios del vehículo privado cambian al transporte público o al SITOD, todos los usuarios del transporte público siguen utilizando este y no se producen desplazamientos en SITOD debidos a personas que antes no se desplazaban, y el valor mínimo teórico se produce cuando todos los usuarios del transporte público dejan de utilizar este para utilizar el vehículo privado, los usuarios del vehículo privado no cambian al SITOD ni al transporte público convencional, y todas las personas que antes no se desplazaban empiezan a utilizar el SITOD. Los valores numéricos dependen de las características de la zona objeto de estudio.

En el escenario 2, el valor máximo teórico que puede tomar este indicador se alcanza cuando todos los usuarios del vehículo privado cambian al SITOD y no se producen desplazamientos en SITOD debidos a personas que antes no se desplazaban, y el valor mínimo teórico se produce cuando ningún usuario del vehículo privado cambia al SITOD, y todas las personas que antes no se desplazaban empiezan a utilizar el SITOD.

Beneficio económico medio para los usuarios del SITOD

Se propone utilizar una función de utilidad bilineal con pendientes diferentes en la parte positiva de la escala [0,1] y en la parte negativa de la misma [-1,0]. Según el Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades (MFOM, 1996), este tipo de funciones son especialmente apropiadas para los criterios de costes y podrían usarse para los demás criterios de evaluación.

En este caso el valor máximo teórico que puede tomar este indicador depende de las características de los usuarios del SITOD en cada zona objeto de estudio, y se alcanzaría si la tarifa del SITOD fuese nula. El valor mínimo teórico que puede tomar se alcanzaría si el coste del SITOD fuese el mismo que el de un servicio de taxi. Si la tarifa del SITOD fuese superior al coste de un taxi convencional el servicio no sería utilizado por ningún usuario.

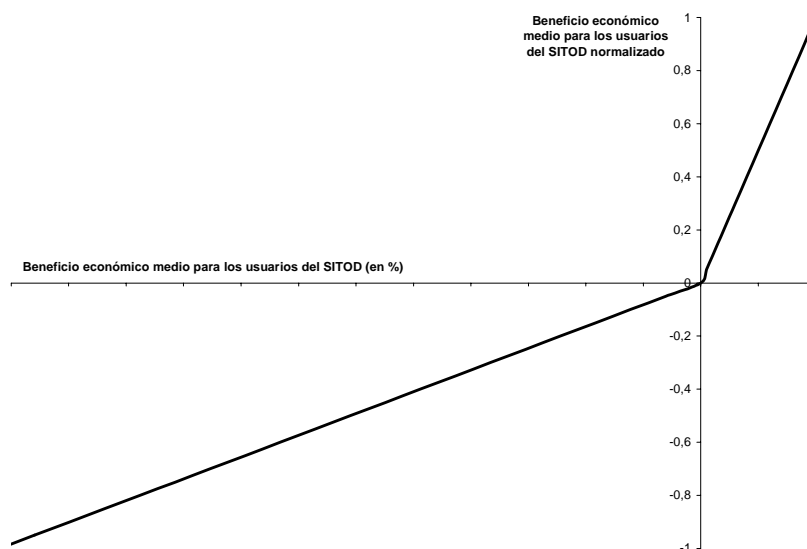


Gráfico 4.10.- Función de utilidad para el beneficio económico medio para los usuarios del SITOD.

Variación de la contaminación atmosférica

Se propone utilizar una función de utilidad no lineal con pendiente decreciente, dado que pequeñas variaciones de la emisión de contaminantes pueden ser valoradas muy

positivamente, en tanto que cambios muy elevados de la emisión serán menos valorados.

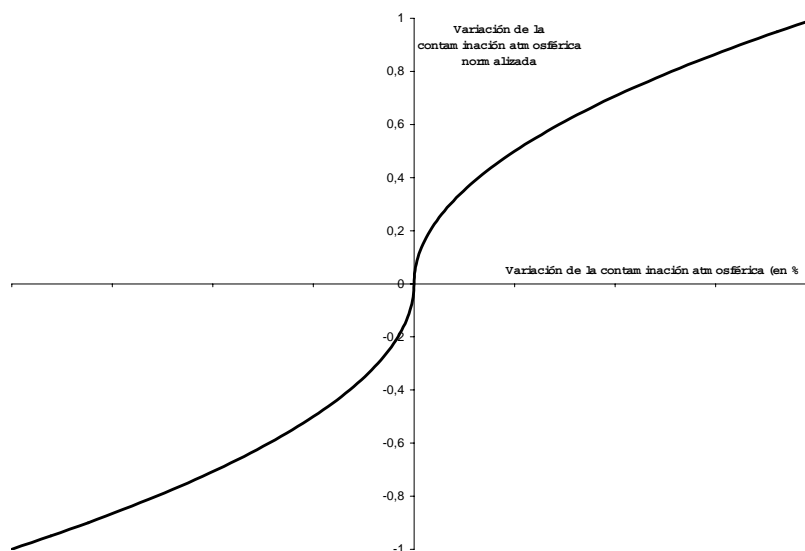


Gráfico 4.11.- Función de utilidad para la variación de la contaminación atmosférica.

Los valores máximos y mínimo teóricos que puede tomar este indicador, en el límite, son 1 y $-\infty$. Tomará el valor 1 cuando la contaminación atmosférica después de la puesta en servicio del sistema sea nula, y el valor $-\infty$ cuando dicha contaminación atmosférica después de la puesta en servicio del sistema sea infinita.

Variación del impacto por ruido

Se propone utilizar una función de utilidad lineal, debido a que la utilidad se puede considerar que es proporcional al número de personas que son más o menos afectadas por el ruido.

Los valores máximos y mínimos teóricos que puede tomar este indicador es que el 100% de las personas estén menos afectadas por el ruido después de la puesta en servicio del SITOD (máximo) o que el 100% se encuentren más afectadas (mínimo).

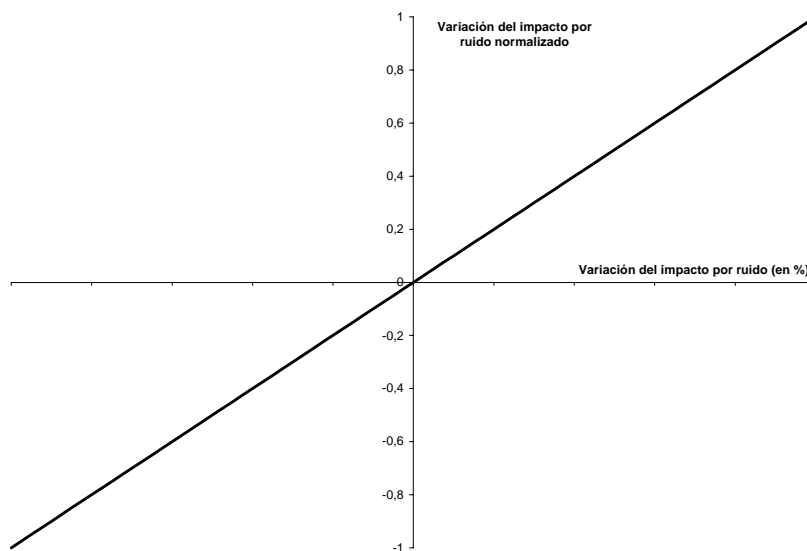


Gráfico 4.12.- Función de utilidad para la variación del impacto por ruido.

4.2.4.2.2.- Ponderación preferencial de los indicadores.

Como ya se ha indicado, el objetivo es establecer un indicador global de evaluación (IG) a partir de los seis indicadores previamente construidos y normalizados (U_i). Este indicador incluye las preferencias relativas del centro decisor por unos criterios respecto a otros (w_i). La expresión del indicador global de evaluación sería la siguiente:

$$IG = w_A \times U_A + w_M \times U_M + w_{MP} \times U_{MP} + w_B \times U_B + w_{CA} \times U_{CA} + w_R \times U_R \quad (73)$$

siendo:

- U_A : Indicador de variación de la accesibilidad global normalizado
- U_M : Indicador de variación en la movilidad global normalizado
- U_{MP} : Indicador del cambio modal neto hacia los modos públicos de transporte normalizado
- U_B : Indicador del beneficio económico medio para los usuarios del SITOD normalizado
- U_{CA} : Indicador de variación de la contaminación atmosférica normalizado

U_R : Indicador de variación del impacto por ruido normalizado

w_i : Peso o preferencia relativa del indicador i con respecto al resto de los indicadores

El indicador global de evaluación, tal y como ha sido definido, indica las ganancias (si adopta un valor positivo) o pérdidas (si adopta un valor negativo) de utilidad que soportaría la población de una determinada zona, debido a la implantación de un Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda.

Algunos de los procedimientos para poder estimar pesos preferenciales (w_i) son los que se exponen a continuación (MFOM, 1996; Romero, 1996):

- Ranking ponderado (a decidir por el decisor o los decisores). La forma más sencilla de abordar esta tarea consiste en pedir al centro decisor que clasifique los criterios por orden de importancia de mayor a menor. Se asigna un peso 10 al criterio más alto del ranking (criterio de referencia) y se asignan pesos entre 0 y 10 a los demás criterios, de acuerdo con su posición con respecto al criterio de referencia. Por último, se normalizan los pesos para que sumen la unidad. Este procedimiento presenta inconvenientes de dos tipos: por una parte, no tiene en cuenta la intensidad con la que el criterio i -ésimo es preferido al j -ésimo, y por otra parte, ordenar simultáneamente los n criterios es una tarea complicada para cualquier centro decisor, muy en especial cuando el número n de criterios es elevado.
- Proceso analítico de jerarquización. Este tipo de dificultades puede superarse recurriendo a un procedimiento sugerido por Saaty (1980) que constituye la base de la metodología multicriterio conocida por procesos analíticos jerarquizados. Este procedimiento requiere del centro decisor la comparación simultánea de sólo dos objetivos. Es decir, el centro decisor ha de realizar una comparación de valores subjetivos por “parejas”. Los valores numéricos que propone aplicar Saaty son los siguientes: (1) cuando los criterios son de la misma importancia; (3) moderada

importancia de un criterio respecto a otro; (5) fuerte importancia; (7) demostrada importancia; y (9) extrema importancia.

- Consulta a grupos afectados. Otro procedimiento bastante empleado, cuando se estén considerando un número bajo de criterios y sea factible obtener un pronunciamiento claro del decisor o decisores sobre el peso u orden de preferencia de los criterios, es la consulta y discusión de grupos afectados. Uno de los más empleados es el método Delphi, en el que se recaban anónimamente y por escrito unas primeras estimaciones de un grupo de expertos. El anonimato es una característica importante para evitar que se pueda producir sesgos debidos a posiciones jerárquicas, grupos de poder, etc. A continuación hay una serie de rondas en las que sistemática y controladamente se difunde la información obtenida, confrontando a los diferentes expertos con las opiniones de sus colegas y recogiendo las respuestas y reacciones de tal proceso. Finalmente hay una etapa en la que se obtiene estadísticamente la respuesta del grupo de expertos, es decir, en la que se forma una estimación única a partir de los resultados de las fases anteriores.

Dado el número de indicadores utilizados en la metodología de evaluación del SITOD (seis) se propone este último método para la determinación de los pesos (w_i) de cada uno de los indicadores normalizados (U_i).

4.2.4.4.- Medidas de gestión.

Para hacer frente a una adecuada gestión de la movilidad en el corredor en estudio, la Administración responsable dispone de una serie de medidas que se enumeran a continuación:

- Puesta en marcha de medidas de publicidad, marketing e información sobre las características del SITOD
- Modificación de las tarifas del SITOD

- Medidas para optimizar la gestión y las rutas del SITOD
- Estudio de las medidas infraestructurales de apoyo al transporte público y al SITOD
- Creación de nuevas líneas de transporte público convencional
- Medidas para mejorar la calidad de los servicios de transporte público
- Limitar el aparcamiento de vehículos privados: disminuir el espacio disponible, límites de tiempo, etc.
- Internalizar los costes externos del transporte privado mediante impuestos
- Medidas restrictivas para el transporte privado (vías cortadas al tráfico del vehículo privado)
- Medidas de pricing

En función de los valores que tomen los seis indicadores, el método de evaluación que se propone contempla el estudio de una o varias de estas medidas, con el objetivo de modificar los valores de dichos indicadores.

4.3. Limitaciones.

Las limitaciones de la metodología propuesta son las siguientes:

- No es objeto de esta metodología estimar el número de viajes que se realizarán después de la puesta en funcionamiento de un Sistema de Transporte Optimizado a la Demanda. Si la metodología se emplea para evaluar un sistema que ya se encuentra en funcionamiento, estos viajes se determinan mediante encuestas o estudios de movilidad, y si lo que se pretende es evaluar un sistema que se va a poner en marcha, se pueden utilizar las técnicas existentes en la bibliografía.

- No se tienen en cuenta los beneficios sobre las administraciones y sobre los proveedores del servicio.
- No se tienen en cuenta los cambios producidos por el SITOD en el funcionamiento global del sistema de transportes del área objeto de estudio.
- No se tienen en cuenta las características sociológicas y psicológicas de los individuos a la hora de elegir un modo de transporte.
- Al establecer los objetivos, la metodología no fija una escala o grado de cumplimiento, únicamente indica si la variación es positiva o negativa, y deja en manos del decisor (político en la mayoría de los casos) el establecimiento de dicho criterio.

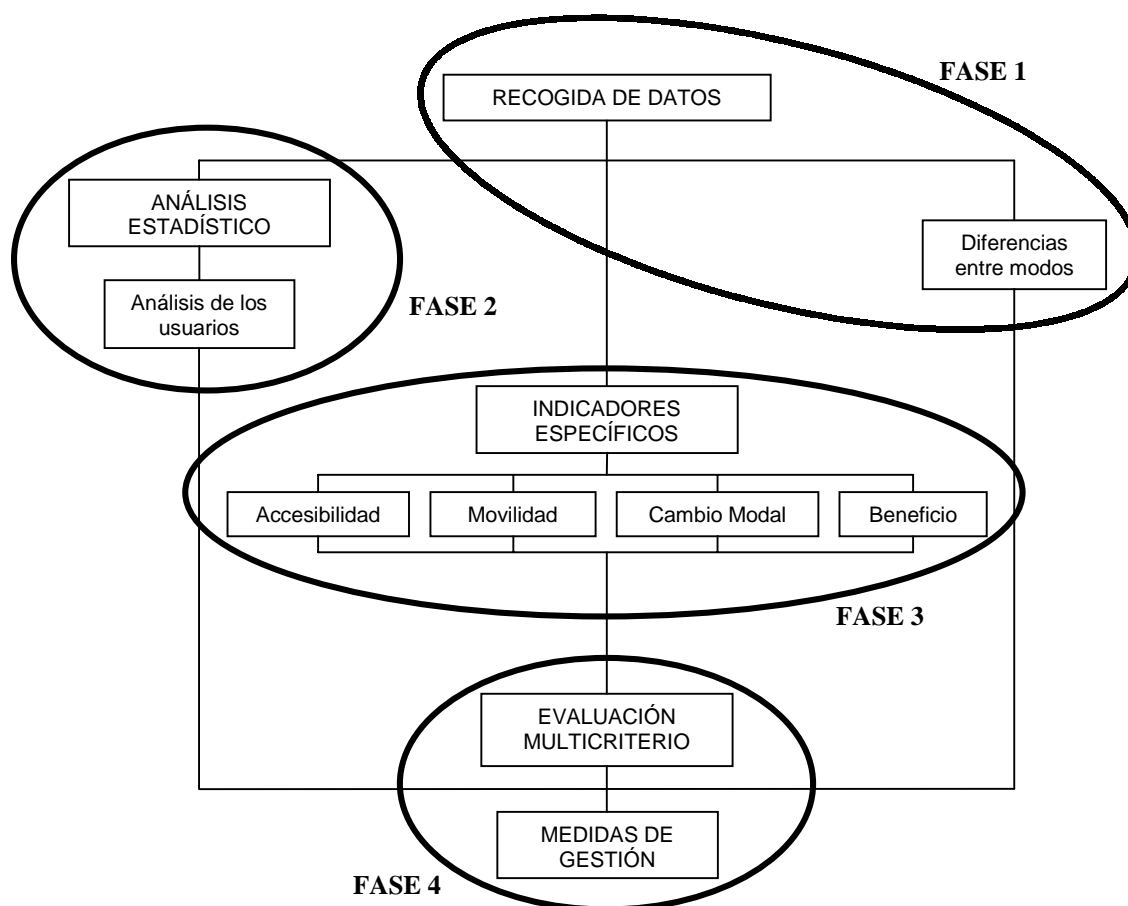


Figura 4.1.- Resumen de la metodología propuesta.

4.4. Resumen de la metodología propuesta.

En la tabla 4.4 se resume la metodología que se propone, se expone en que fase de la misma se alcanza cada uno de los objetivos planteados y se describen los instrumentos que se emplean en cada una de las fases:

| OBJETIVOS | FASES DE LA METODOLOGÍA | INSTRUMENTOS |
|--|--|---|
| Análisis y caracterización de los usuarios de cada uno de los modos de transporte existentes | Fase 1.- Recogida de datos Fase 2.- Análisis estadístico | Estudios y encuestas de transporte anteriores o ad hoc ANOVA y distribución de frecuencias |
| Análisis y caracterización del SITOD | Fase 1.- Recogida de datos | Datos de la empresa concesionaria del servicio |
| Análisis de las diferencias significativas existentes entre el vehículo privado y el SITOD | Fase 1.- Recogida de datos | Datos de la empresa concesionaria del servicio |
| Análisis de las diferencias significativas existentes entre el transporte público y el SITOD | Fase 1.- Recogida de datos | Datos de las empresas concesionarias o de las administraciones |
| Determinación de los cambios de accesibilidad | Fase 1.- Recogida de datos Fase 3.- Indicadores específicos | Estudios y encuestas de transporte anteriores o ad hoc Indicador de accesibilidad |
| Determinación de los cambios en la movilidad | Fase 1.- Recogida de datos Fase 3.- Indicadores específicos | Estudios y encuestas de transporte anteriores o ad hoc Indicador de movilidad |
| Determinación del cambio modal | Fase 1.- Recogida de datos Fase 3.- Indicadores específicos | Estudios y encuestas de transporte anteriores o ad hoc Indicador de cambio modal |
| Determinación del beneficio para los usuarios y la sociedad | Fase 1.- Recogida de datos Fase 3.- Indicadores específicos | Estudios y encuestas de transporte anteriores o ad hoc Indicador de beneficio |
| Evaluación del grado de cumplimiento de los objetivos propuestos | Fase 4.- Evaluación multicriterio | Indicadores de accesibilidad, movilidad, cambio modal y beneficio Indicador global de evaluación |
| Gestión de la movilidad a adoptar | Fase 4.- Medidas de gestión | Medidas específicas de gestión de la movilidad |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4.- Metodología: Objetivos – Fases – Instrumentos

